

# Características da Propagação em Fibras Ópticas

**José Antônio Justino Ribeiro**

Instituto Nacional de Telecomunicações

Departamento de Telecomunicações

e-mail: justino@inatel.br

**Resumo.** Neste artigo apresentam-se as principais características da propagação da luz através da fibra óptica. Inicia-se com uma descrição das vantagens que conduziram ao crescimento extraordinário deste sistema nos últimos vinte anos. Em seguida, descrevem-se os tipos comuns de fibras, destacando-se as vantagens do emprego dos modelos para um único modo de transmissão e sua utilidade nos modernos sistemas para elevadíssimas taxas de transmissão. Para apresentar uma visão geral das propriedades do sinal transmitido na fibra óptica, empregou-se uma abordagem qualitativa na descrição dos fenômenos envolvidos no processo. Por esta razão, a análise da propagação utilizou, na maioria das vezes, os conceitos da óptica geométrica.

## I. Introdução

A necessidade da implementação de sistemas que permitissem muitas comunicações simultâneas começou a ser imperiosa já nas primeiras décadas do século XX. Por volta de 1926 foram criados os sistemas telefônicos com onda portadora, para transmissão de dois ou quatro canais de voz.<sup>[1]</sup> Os equipamentos sofreram rápida evolução, levando a uma enorme ampliação na quantidade de contatos telefônicos. O aumento na demanda dos serviços de telecomunicações trouxe um congestionamento e uma saturação dos sistemas empregando as faixas tradicionais, incluindo as frequências de microondas. Isto motivou o emprego de valores cada vez mais elevados, onde as portadoras fossem capazes de transportar um número bem maior de canais, através dos sistemas de multiplexação das mensagens. Nos últimos anos intensificaram-se as aplicações na faixa de ondas milimétricas, que correspondem a frequências acima de 30GHz. Tornou-se, então, quase natural que as pesquisas se concentrassem na idéia de se empregarem frequências de luz, ainda que não fossem na faixa visível. Desta forma, foram destinados vultosos investimentos, em vários países, para o aperfeiçoamento e a criação de componentes, equipamentos e sistemas para o emprego da luz em comunicações de elevada capacidade.

O emprego de fenômenos ópticos para comunicações é muito antigo, provavelmente remontando à idade das cavernas. Os sinais de fogo e fumaça já eram utilizados pelos primeiros homens para a transmissão rudimentar de mensagens da época.<sup>[2]</sup> Após o grande avanço da Física durante a Idade Média e a Idade Moderna, em meados do século passado alguns pesquisadores concluíram que a Óptica era uma ciência terminada, da qual se poderia esperar algum avanço dos conhecimentos já adquiridos, sem se conseguirem saltos significativos, nem novas descobertas ou desenvolvimentos muito acentuados. Nessa ocasião, os estudos e aplicações dos fenômenos luminosos em geral ficavam restritos aos que eram possíveis de usarem a Óptica Geométrica. Aperfeiçoaram-se lentes, espelhos e aparelhos ópticos com esses componentes, cujos efeitos eram interpretados a partir do estudo dos raios luminosos.

Evidentemente, a previsão de que a Óptica tinha se completado como ciência falhou. Em primeiro lugar, houve o advento da Óptica Ondulatória, a partir da apresentação da Teoria Eletromagnética de Maxwell. Depois, em função das descobertas científicas do início do século XX, surgiu a Óptica Quântica como uma extensão da Eletrodinâmica Quântica. Os novos conceitos, as novas descobertas e invenções sugeriram inúmeras aplicações para esta área da Ciência. Para exemplificar, nos últimos tempos inventaram-se os diversos tipos de lasers, iniciaram-se os estudos da termovisão e da holografia, foram desenvolvidos os componentes eletroópticos e optoeletrônicos, os componentes acusticoópticos e magnetoópticos, criaram-se os métodos de modulação da luz e aperfeiçoaram-se as fibras ópticas para confinar a propagação da luz em uma região que apresentasse pequena degradação do sinal transmitido. Essas inovações incentivaram um crescente interesse para a aplicação dos comprimentos de onda na faixa do infravermelho, em substituição aos sistemas empregando frequências das bandas tradicionais de rádio e de microondas.

## II. Vantagens das comunicações ópticas

O desempenho em um sistema de telecomunicações costuma ser avaliado principalmente em relação a dois parâmetros fundamentais: o fator de atenuação, que estabelece a distância máxima de transmissão sem necessidade de repetidores, e a largura de banda, que fixará a taxa máxima de modulação permitida dentro de uma distância, sem necessidade de recuperar-se a forma dos pulsos. As fibras ópticas despertaram grande interesse para a modernização das comunicações por suplantarem os sistemas tradicionais nesses dois pontos e apresentarem outras vantagens.<sup>[1][4][5]</sup>

Pode-se começar garantindo que, na situação atual, a fibra óptica apresenta uma perda de potência de por quilômetro muito menor do que os sistemas com cabos coaxiais, guias de ondas ou transmissão pelo espaço livre. Um cabo coaxial operando em 5GHz pode apresentar perda superior a 100dB/km, incomparavelmente superior aos valores de 0,2dB/km e 0,3dB/km obtidos nas modernas fibras ópticas, operando em comprimentos de onda ao redor de 1,3 $\mu$ m e 1,55 $\mu$ m. Isto significa uma quantidade menor de repetidores para a cobertura total do enlace. Nos sistemas radioelétricos da faixa de microondas, com antenas parabólicas de alto ganho, a perda por quilômetro é menor do que nos sistemas a cabos coaxiais ou a guias de onda. Mas, ainda assim, o valor da atenuação é muitas vezes maior do que nos sistemas a fibras ópticas. Nas comunicações por microondas através do espaço livre, as distâncias entre repetidores é de mesma ordem de grandeza dos sistemas ópticos atuais. Todavia, um enlace radioelétrico só pode alcançar distâncias de muitos quilômetros sem o uso de repetidores à custa de uma maior potência de transmissão e instalações de antenas parabólicas

de grandes diâmetros em torres de dezenas de metros de altura.

Na transmissão por fibras ópticas as portadoras possuem frequências na faixa de infravermelho, valores da ordem de centenas de terahertz, fato que permite prever o emprego de elevadíssimas taxas de transmissão, de até milhares de megabits/segundo. Esta propriedade implica em significativo aumento na quantidade de canais de voz sendo transmitidos simultaneamente. Uma das limitações no número de canais fica por conta da interface eletrônica, necessária para imprimir a modulação e a retirada da informação no ponto de chegada do sinal. A capacidade do sistema óptico pode ser aumentada, ainda mais, utilizando-se a técnica de multiplexagem em comprimento de onda (WDM). Por este processo, diferentes comprimento de onda são transmitidos pela mesma fibra óptica, cada um transportando muitos canais de voz como sinal de modulação.

O diâmetro externo da fibra óptica é muito menor do que o dos cabos coaxiais empregados nas faixas de microondas. Tipicamente, uma fibra óptica possui um diâmetro de 125 $\mu$ m. Com o acréscimo de camadas de proteção, o diâmetro final pode alcançar entre 0,4mm e 1mm, dependendo da técnica de fabricação e do tipo de fibra óptica. Resulta em um peso muito reduzido, maior flexibilidade mecânica, menor espaço para instalação, menor custo de transporte e armazenagem, etc..

Na fabricação da fibra óptica utilizam-se vidros altamente transparentes, com elevadíssima resistência elétrica. Portanto, não necessita aterramento, nem há necessidade de ser protegida contra descargas elétricas. Além do aspecto da segurança em seu manuseio durante a instalação, a manutenção e a operação, a fibra é capaz de suportar elevadíssimas diferenças de potencial sem riscos para o sistema, para o operador ou para o usuário.

Sendo um meio altamente isolante, não é possível a indução de correntes na fibra óptica por quaisquer fontes que estiverem em suas proximidades. Por conseguinte, a transmissão é imune às interferências eletromagnéticas externas. Isto permite sua instalação em ambientes ruidosos do ponto de vista eletromagnético, sem que este fato cause deterioração na qualidade do sinal guiado. Esta sua característica permitiu o desenvolvimento de cabos especiais de fibras ópticas que acompanham as linhas de transmissão de energia elétrica de alta tensão, compartilhando das mesmas instalações. Um destes sistemas é o cabo OPGW (*optical ground wire*), formado por fibras ópticas no interior de um cabo pára-raios das linhas de transmissão de energia elétrica.

Como uma das conseqüências desta imunidade, os sistemas a fibra óptica garantem uma qualidade de transmissão melhor do que os enlaces de microondas ou com cabos coaxiais e guias de ondas. O padrão em sistemas de comunicações digitais com fibras ópticas estabelece uma taxa de erro de bit de  $10^{-9}$ , sendo o valor  $10^{-11}$  ou mesmo melhor um objetivo possível de ser alcançado. É um valor significativamente superior à dos sistemas convencionais, nos quais se consegue 1 bit errado para cada  $10^5$  a  $10^7$  bits transmitidos.

Da mesma forma que o sinal óptico guiado não sofre interferências externas, não poderá também perturbar um sistema próximo, a não ser que haja um contato físico ou que a fibra tenha sofrido certo tipo de deformação. Em condições normais de propagação, a luz não é irradiada a partir da fibra óptica, não podendo ser captada por um equipamento externo.

O resultado é a garantia de um sigilo quase absoluto para a informação transmitida. O sistema fica interessante para comunicações militares, transmissão de dados entre bancos e outras aplicações onde o sigilo seja de importância para a eficiência do sistema.

A fibra óptica apresenta também imunidade a pulsos eletromagnéticos. O pulso eletromagnético (EMP) é uma irradiação de grande amplitude originada por uma explosão nuclear na parte alta da atmosfera. Os campos magnéticos gerados por partículas atômicas em altas velocidades causam um movimento de rotação nos elétrons livres existentes nessa região. Esse movimento é responsável pela emissão de um pulso de curta duração, com elevada energia de pico. Quando essa onda eletromagnética transitória encontra um condutor ela induzirá uma corrente que pode alcançar valores muito elevados de pico. Quase sempre ocorrem danos nos equipamentos eletrônicos ligados às extremidades do fio. Nos sistemas tradicionais evitam-se esses prejuízos com a utilização de filtros de alta potência, supressores de arcos voltaicos e protetores de surto. Embora não seja comum a ocorrência do pulso eletromagnético, em uma situação como essa o emprego da transmissão com fibras ópticas não só preservaria a qualidade do sinal guiado como também reduziria o peso e o custo do sistema instalado. É uma vantagem muito importante para aplicações em aviões militares e em sistemas de telecomunicações para fins estratégicos.

Considerando que a fibra óptica é construída a partir da sílica ( $\text{SiO}_2$ ), sua matéria prima representa um dos materiais mais abundantes da Terra. Para se ter uma idéia, a sílica é o principal componente da areia. Com a tecnologia atual, não é conveniente a fabricação da fibra óptica a partir deste material. Utiliza-se o quartzo cristalino, do qual existem gigantescas reservas, sendo no Brasil uma das mais importantes jazidas. Tem-se, por conseguinte, uma garantia contra eventuais escassez de matéria prima, que poderia elevar o custo final do sistema.

Outra consideração relevante é que as fibras ópticas modernas apresentam largura de faixa muito grande (multigigahertz x quilômetros) com baixa atenuação e pequena dispersão dos pulsos emitidos. Por estas propriedades, os sistemas a fibra são os que apresentam o menor custo por quilômetro por canal instalado.

### **III. Considerações adicionais relativas às comunicações por fibras ópticas**

Embora as características vantajosas das fibras ópticas superem em muito eventuais inconvenientes, alguns efeitos devem ser conhecidos, a fim de se orientar adequadamente a sua utilização. Sabe-se, por exemplo, que pode ocorrer difusão de moléculas de hidrogênio para o interior da sílica, alterando as características de transmissão. A atenuação no sinal guiado será afetada principalmente devido a dois fatores. Em primeiro lugar, moléculas de hidrogênio que não reagem com a sílica absorvem parte da energia da luz em movimentos de vibração dentro do vidro. Como segunda causa, o hidrogênio pode reagir com a sílica, formando íons hidroxilas acumulados em determinados pontos do vidro. A concentração desses íons depende da composição da fibra, da temperatura e da pressão do gás hidrogênio. A perda apresenta valor máximo em um comprimento de onda de

1,24 $\mu\text{m}$  e está associada à pressão do gás. As fibras multimodos empregadas nos sistemas ópticos de primeira geração eram mais sensíveis a este problema por causa de uma alta taxa de fósforo na composição de sua região central. Nas fibras mais modernas, de tipo monomodo, o efeito é desconsiderável. Experiências realizadas nos laboratórios da BTRL, por um período de 25 anos, mostraram que na fibra monomodo operando em 1,3 $\mu\text{m}$ , com uma difusão de 1000 partes por milhão da molécula de hidrogênio, houve aumento na perda em somente 0,05dB/km na temperatura de 25°C.<sup>[5]</sup>

Embora não seja uma situação corriqueira, verificou-se que ao ser bombardeada por partículas nucleares de grande energia a fibra óptica fica mais opaca, dificultando a transmissão da luz. Sob uma irradiação de alta intensidade, a fibra óptica brilha e, logo em seguida, escurece rapidamente. Cessada a irradiação, a perda na transmissão vai se reduzindo, mas estabiliza-se em um valor intermediário maior do que o existente antes do evento. Portanto, ocorre um dano de caráter permanente no guia óptico. A rapidez com que a fibra tende a recuperar as características de transmissão depende da temperatura, com tempo menor em temperaturas mais elevadas. O valor final da atenuação depende do tipo e da quantidade de dopantes utilizados no vidro. A influência será maior nos comprimentos de onda de menores atenuações da fibra (1,3 $\mu\text{m}$  e 1,55 $\mu\text{m}$ ).

O fato de a fibra óptica não permitir o fluxo da corrente elétrica pode ser uma vantagem, como já discutido, mas em outras ocasiões pode representar um inconveniente. Por exemplo, se houver necessidade de se alimentar os circuitos eletrônicos em suas extremidades. Nesses casos, o cabo de fibras ópticas deve pares metálicos para este objetivo e a sua produção é mais complexa do que os modelos totalmente metálicos.

A redução no custo de um sistema óptico só é sentida quando puderem ser aproveitadas sua elevada capacidade de transmissão e pequena atenuação. Ao se empregar uma fibra de baixa atenuação e grande largura de banda em um sistema de pequena distância e baixa capacidade o custo pode ser superior aos que empregam cabos de cobre. Só se justifica quando outras propriedades do sistema forem exigidas, tais como a imunidade às interferências e a exigência de sigilo na comunicação.

Outro aspecto que se deve ter em mente é o dos comprimentos limitados dos cabos ópticos, que necessitam ser emendados para a complementação de um determinado enlace. Isto exige uma tecnologia mais sofisticada do que a aplicada às estruturas com condutores de cobre. Existem equipamentos que permitem a execução rápida da emenda na fibra. Um sistema comum é o que emprega a máquina de fusão por arco voltagem, capaz de executar uma ligação entre duas pontas da fibra de forma quase perfeita. O custo desse equipamento é elevado, dado ao valor baixo da perda final que deve garantir na emenda. Para a ligação dos conectores e a realização de emendas mecânicas, têm-se dificuldades semelhantes. A precisão dos componentes deve ser bastante rigorosa e tem-se de dispor de recursos e ferramentas que facilitem o alinhamento das partes a serem conectadas, para garantir a mínima perda.

Finalmente, a transmissão e a detecção em um sistema óptico devem ser feitas em comprimentos de onda bem definidos, fixados pelas características das fontes de luz, dos fotodetectores e pelas faixas que permitem o melhor

desempenho das fibras ópticas. Assim, não é possível, por enquanto, ajustar-se a frequência de operação ao valor que seria mais conveniente a uma ou outra aplicação. Nos sistemas tradicionais esse parâmetro é controlado com alguns elementos dos circuitos de um oscilador eletrônico no transmissor e no receptor.

#### IV. Alguns conceitos sobre a luz e sobre a teoria eletromagnética

Fenômenos luminosos têm sido estudados há séculos, partindo de princípios e leis estabelecidos por vários pesquisadores. Até o século passado, foram introduzidos os preceitos da Óptica Geométrica, que utiliza o traçado de raios para analisar os fenômenos da propagação. Considera-se a transmissão da luz em uma trajetória retilínea, representada pelo raio luminoso. Este comportamento foi uma das primeiras propriedades exploradas da luz e está presente quando a propagação ocorrer em um meio homogêneo ilimitado, bem distante da fonte de irradiação. A partir dos estudos de Einstein, ficou comprovado que a propagação da luz segundo uma reta em um meio homogêneo não é um conceito exato. A sua trajetória sofre uma curvatura em presença de corpos com elevada densidade de massa. Em termos práticos, esta influência pode ser desconsiderada no caso da gravidade da Terra. O estudo de irradiação como fenômeno representado por um conjunto de raios é válido quando as dimensões do meio forem muito grandes comparadas com o seu comprimento de onda.

A irradiação eletromagnética é tratada quase sempre como uma onda formada pelos campos elétrico e magnético variáveis no tempo que se propagam no meio. Todavia, existem fenômenos que só podem ser completamente estudados a partir da aceitação de uma característica de dualidade onda-partícula. Esses fenômenos, incluindo a geração da luz, a emissão e absorção de energia por átomos e moléculas, as interações com o meio e com partículas microscópicas carregadas, tais como elétrons, pósitrons e tauons, devem ser estudados a partir da Eletrodinâmica Quântica, na parte que trata da Teoria Quântica da Irradiação.<sup>[6]</sup> Essa teoria estabelece que uma irradiação pode comportar-se como onda ou como partícula, dependendo das circunstâncias ou do fenômeno a ser interpretado. A quantidade de energia correspondente é múltipla de um valor fundamental denominado *quantum* (plural *quanta*), que atuaria como um corpúsculo de massa nula associado ao campo eletromagnético. Quando a frequência da irradiação estiver na faixa de luz, o quantum de energia é mais conhecido como *fóton*. Por esta razão, o estudo dos fenômenos luminosos que se baseiam nestes princípios fazem parte da denominada Teoria de Fótons.

Segundo a lei de Planck, o quantum de energia é diretamente proporcional à frequência  $\nu$  da irradiação eletromagnética. A energia do fóton é

$$E = h \nu \quad (1)$$

sendo  $h = 6,626 \times 10^{-34}$  joules.segundo a constante de Planck.

O espectro óptico inclui frequências entre  $3 \times 10^{11}$ Hz e  $3 \times 10^{16}$ Hz, correspondendo ao extremo inferior da faixa de infravermelho e o limite superior da faixa de ultravioleta. O interesse para comunicações ópticas são as frequências no infravermelho na faixa de  $1,5 \times 10^{14}$ Hz a  $4 \times 10^{14}$ Hz,

aproximadamente. São valores muito maiores do que os limites comuns de radiocomunicações. De acordo com a teoria eletromagnética, em um ambiente aberto, sem fronteiras próximas, os campos elétrico e magnético da onda são perpendiculares entre si e contidos em um plano transversal à direção de propagação. Esta solução das equações de Maxwell é referida como onda eletromagnética transversal.

Medições e estudos mais confiáveis mostram que a velocidade da onda eletromagnética no vácuo é de  $c = 2,99792 \times 10^8 \text{ m/s} \cong 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ , independentemente da frequência e do referencial utilizado. Esta representa a máxima velocidade com que a energia poderá deslocar-se em um meio ilimitado, sendo conhecida como velocidade limite. Em outros meios ilimitados, a velocidade da luz será sempre menor do que o valor no vácuo. O número que relaciona a velocidade no vácuo ( $c$ ) com a velocidade em outro meio, ( $v$ ), é o índice de refração ( $N$ ):

$$N = \frac{c}{v} \quad (2)$$

Usualmente, em lugar das frequências ópticas expressam-se os correspondentes comprimentos de onda, que representa a distância necessária para que uma onda senoidal sofra uma variação de fase de  $2\pi$  radianos, em uma direção especificada. Quando essa direção for omitida, admite-se que a medição seja feita na direção de propagação da onda. O valor pode ser calculado pela relação entre a velocidade de deslocamento da onda no meio e a sua frequência. Se o meio não for especificado, considera-se como sendo o vácuo e o comprimento de onda fica dado por

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3)$$

Para as comunicações ópticas o valor calculado pela equação anterior está entre 800nm e 1600nm, aproximadamente no meio da faixa conhecida como infravermelho próximo. Em vista das Equações (1) e (3), a energia de um fóton, pode ser expressa em termos do comprimento de onda. Nas análises dos fenômenos ópticos é usual expressar-se a energia em eletrôn-volts (eV) e o comprimento de onda em micrometros ( $\mu\text{m}$ ). Como o valor de 1eV equivale a  $1,602 \times 10^{-19}$  joules e  $1\mu\text{m}$  é igual a  $10^{-6}$  metros, a Equação (1) acima torna-se

$$E(\text{eV}) = \frac{1,241}{\lambda(\mu\text{m})} \quad (4)$$

A luz comum é constituída de diversas frequências próximas entre si, formando um sinal composto pela superposição dos vários campos. Por exemplo, a luz visível irradiada por uma lâmpada incandescente contém frequências que vão da luz azul, cuja frequência é da ordem de  $6 \times 10^{14} \text{ Hz}$ , até valores inferiores ao vermelho, correspondente a  $4 \times 10^{14} \text{ Hz}$ . Como as frequências são bem próximas, as interferências entre elas darão origem a um sinal que apresentará valores resultantes da soma de componentes quase em fase (interferência construtiva) e componentes quase em contra-fase (interferência destrutiva). O sinal assim composto constitui um grupo de ondas que se desloca no meio. A velocidade de propagação deve ser considerada como a rapidez de deslocamento do conjunto que representa toda a irradiação e não a velocidade de uma única componente. Este

deslocamento por unidade de tempo é conhecido como velocidade de grupo.<sup>[21]</sup> Existem meios nos quais a velocidade de grupo é igual à velocidade de uma componente da onda. São os meios não-dispersivos e um exemplo é o meio ilimitado sem perdas, como é o caso do vácuo. Em meios dispersivos, a velocidade de propagação de cada componente depende da frequência. Assim, as relações de fase que deram origem às interferências construtivas e destrutivas em um certo ponto não são preservadas à medida em que o sinal avança na região. Como consequência, o formato resultante modifica-se ao longo do meio de propagação, fenômeno denominado dispersão.

## V. O guia de ondas óptico básico

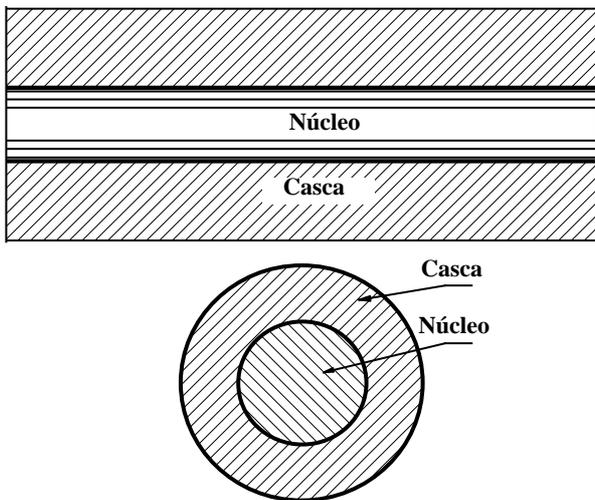
O modelo atual da fibra óptica é resultado de um avanço tecnológico determinado pela contribuição de grande quantidade de pesquisadores e pelo enorme investimento financeiro feito por diferentes empresas e centros de pesquisas em todo mundo. As limitações mais importantes em seu emprego começaram a ser superadas com o advento do guia óptico recoberto em 1954, a partir dos trabalhos do pesquisador holandês van Heel<sup>[7]</sup> e pela equipe britânica dirigida por Hopkins e Kapany<sup>[8]</sup>. O recobrimento consistia em um material dielétrico com um índice de refração ligeiramente menor do que o do meio no qual se desejava a propagação da luz. A fibra óptica passou a ser constituída de um *núcleo*, com índice de refração  $N_1$ , e uma *casca*, com índice de refração  $N_2$ , sendo  $N_2 < N_1$ <sup>[9][10]</sup>, como na Figura 1.

Estes primeiros modelos práticos não tinham por objetivo a aplicação em telecomunicações. O trabalho de van Heel, por exemplo, tinha como meta o desenvolvimento de um endoscópio a fibra, para aplicações médicas. Entretanto, o enorme impacto advindo com a invenção do laser, estimulou a tentativa de se empregar a luz coerente para fins de comunicações a grandes distâncias. Em 1964 começaram os estudos mais aprofundados e em 1966 foram publicados por Kao e Hockham<sup>[10]</sup> os primeiros trabalhos que garantiam a possibilidade da fibra óptica ser empregada para enviar mensagens a grandes distâncias e com elevadas taxas de transmissão.

As experiências foram realizadas com os melhores materiais transparentes, tais como os vidros ópticos de alta qualidade, a sílica fundida, o metacrilato de polimetil, etc.. Infelizmente, os primeiros resultados mostraram atenuações que alcançavam a casa das centenas de decibels/km. O sistema seria, portanto, impraticável, uma vez que os enlaces por microondas apresentavam perdas substancialmente menores. Contudo, já estava dominada uma certa tecnologia de fabricação, conhecia-se o tratamento matemático a ser dado à propagação e estavam identificadas as principais causas da enorme atenuação. Kao e Hockham concluíram que uma das origens das perdas estava na presença de íons de impurezas no vidro. Destacavam-se os íons metálicos, tais como os de cobre, ferro, cromo, vanádio. Eram de grande importância também os íons advindos de moléculas de água retidos na estrutura do vidro, conhecidos como íons hidroxila ou oxidrila.

Ainda que fossem em quantidades extremamente reduzidas, com taxas da ordem de algumas partes por milhão, já seriam suficientes para acarretarem perdas de vários decibels por quilômetro em alguns comprimentos de onda.<sup>[10]</sup>

Até meados da década de 60, o material que apresentava boas qualidades de transmissão era a sílica, que também apresentava facilidade de obtenção das quantidades necessárias para escala industrial. Como referência, pode-se citar que foram alcançadas atenuações na casa dos 5dB/km em comprimentos de onda em torno de 800nm.<sup>[11]</sup>



**Figura 1.** Vista em corte longitudinal e em corte transversal de uma fibra óptica, apresentando o núcleo e a casca sem as camadas de proteção externas.

A exigência de aperfeiçoamento nas características de transmissão e nas propriedades mecânicas impôs modificações no material original, com a introdução de outros componentes que permitissem alterar o valor do índice de refração, a flexibilidade da estrutura, a estabilidade das características, etc.. A primeira fibra prática foi obtida pela Corning Glass Works, que empregou uma combinação de sílica e titânio, com perdas que chegaram a casa dos 20dB/km.<sup>[12]</sup> Com um fator de atenuação desta ordem já se tornava exequível um sistema de comunicações utilizando a fibra óptica como meio de transmissão. A estrutura destas fibras era a mais simples possível, com um núcleo de índice de refração ligeiramente diferente da casca externa, conhecida como fibra de índice em degrau.

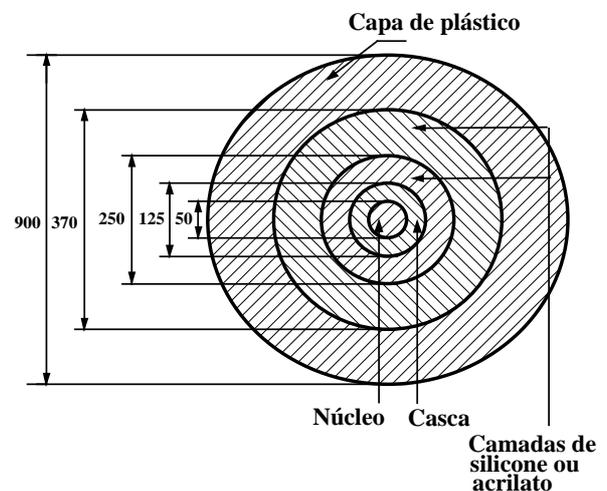
Diversas outras tentativas foram feitas, tais como dopagem com silicato de boro<sup>[13]</sup>, os vidros com fosfosilicatos<sup>[14]</sup>, os vidros dopados com germânio<sup>[15]</sup>, sílica dopada com alumina<sup>[16]</sup>, e com fluorina<sup>[12]</sup>. Além das alterações na composição do núcleo, foram estudadas modificações na forma de distribuição dos valores do índice de refração ao longo da direção radial do núcleo, com o objetivo de evitar grandes degradações no sinal de modulação ao longo da fibra. Esta época prolongou-se até o final da década de 70, com a proposição da fibra de núcleo com índice gradual e com o início das aplicações da fibra de tipo monomodo. Fixaram-se novas tecnologias empregadas nos comprimentos de onda de 850nm e 1,3µm, originando a segunda geração dos sistemas ópticos.

De 1974 para cá a tecnologia de fabricação permitiu que se obtivessem fibras para transmissão multimodo com atenuações abaixo de 3dB/km em comprimentos de onda em torno de 850nm (primeira janela de baixa atenuação), perdas inferiores a 0,3dB/km para transmissões em 1,3µm (segunda janela de baixa atenuação) e perdas ainda menores, ao redor

de 0,20dB/km em comprimentos de onda por volta de 1,55µm (terceira janela de baixa atenuação). Estes valores de comprimentos de onda foram determinados como os mais convenientes para comunicações. Por exemplo, verificou-se que em 1,3µm a fibra óptica com núcleo de sílica apresentava mínima dispersão dos pulsos transmitidos.<sup>[17]</sup> Como é um valor coincidente com uma janela de pequena atenuação, partiu-se para o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de dispositivos e sistemas que operassem em torno deste comprimento de onda. Os modelos de fibras óptica para transmissão em um único modo de propagação, os equipamentos, componentes e dispositivos para aplicação nesses comprimentos de onda constituíram o sistema de terceira geração.

Mesmo com os aperfeiçoamentos que se seguiram desde essa época, a estrutura básica da fibra continua a mesma, como apresentada na Figura 1. Todavia, houve necessidade de se incluírem proteções, a fim de se garantir sua durabilidade. Sabe-se, por exemplo, que a resistência mecânica intrínseca da fibra óptica é bem elevada. Experiências comprovam que ela é capaz de suportar um esforço de tração de 5.000MN/m<sup>2</sup> contra 3.000MN/m<sup>2</sup> do fio de aço. Entretanto, na prática, é possível de ocorrer fraturas microscópicas na superfície, que se propagam rapidamente em direção ao núcleo, reduzindo dramaticamente sua capacidade de suportar trações ou outros esforços mecânicos.

A formação dessas microfaturas decorre de agentes externos, tais como umidade, variações de temperatura, contactos com partículas ou substâncias químicas do ambiente, etc..<sup>[18][19][20]</sup> Por esta razão, a fibra moderna apresenta camadas de proteções externas, assumindo o aspecto da Figura 2. Neste modelo, entre a casca e a camada de plástico final estão incluídas duas outras camadas que podem ser de resina silicônica ou de acrilato. A camada mais interna é um pouco mais macia, para atuar como elemento amortecedor de algumas agressões mecânicas externas. As fibras com acrilato têm a vantagem de possuir um diâmetro final menor do que o modelo representado na figura. Existem outros valores recomendados pelos organismos internacionais que normalizam a fabricação das fibras ópticas e cabos. As dimensões indicadas são para a denominada fibra multimodo. A fibra monomodo com camadas de acrilato possui o diâmetro do núcleo inferior a 10µm e seu diâmetro total externo é inferior a 0,4mm.



**Figura 2.** Vista em corte transversal de uma fibra óptica, apresentando o núcleo, a casca e as camadas de proteção. As dimensões indicadas estão em micrometros.

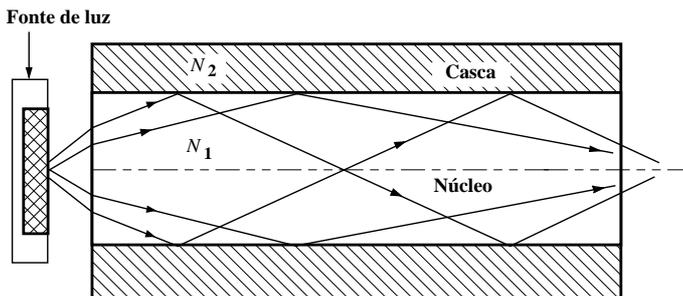
## VI. Funcionamento do guia óptico básico

Tomando por referência a Figura 1, a teoria eletromagnética<sup>[21]</sup> estabelece que quando a onda eletromagnética incidir na fronteira de separação do núcleo com a casca parte da energia pode retornar ao núcleo, formando a onda refletida, e parte pode ser transferida para a casca, constituindo a onda refratada. Como o núcleo possui maior índice de refração do que a casca, existe um ângulo de incidência em relação à normal à separação entre esses dois materiais a partir do qual toda a energia reflete-se para o núcleo, não havendo transferência de potência para a casca. Este ângulo é conhecido como ângulo crítico ( $\theta_c$ ), sendo determinado a partir de

$$\text{sen } \theta_c = \frac{N_2}{N_1} \quad (5)$$

Como é evidente desta equação, o ângulo crítico só existe quando o índice de refração do meio de onde a onda está vindo for maior do que o do meio para o qual a onda estaria indo. Isto é, quando a onda tender a passar de um meio mais denso para um meio menos denso do ponto de vista eletromagnético. Portanto, se o primeiro meio for envolvido por outro de menor índice de refração estabelece-se uma estrutura capaz de guiar a onda eletromagnética através de um processo de múltiplas reflexões sucessivas. O feixe luminoso fica confinado dentro do núcleo, com uma direção resultante de propagação paralela ao eixo longitudinal do sistema. (Figura 3). Esta explicação qualitativa do comportamento da fibra óptica é baseada na Óptica Geométrica, uma abordagem na qual se admite comprimento de onda nulo. Diversos conceitos envolvendo aspectos quantitativos do funcionamento do guia óptico não podem ser explicados com a utilização da teoria dos raios ópticos.

A partir da fonte, o feixe de luz penetra no núcleo segundo um ângulo  $\theta_1$  em relação ao eixo longitudinal da fibra. Por causa da diferença de índices de refração entre o ar e o núcleo, o raio dentro do núcleo muda de direção, o que determinará o ângulo de incidência na superfície de separação com a casca. Se este ângulo for menor do que o valor crítico, o campo não será totalmente refletido e parte de sua energia é transferida para a casca. O fato ocorrerá a cada nova reflexão e após uma curta distância quase toda a energia terá escapado do núcleo e não será útil para envio de mensagens em um enlace óptico.<sup>[22]</sup>

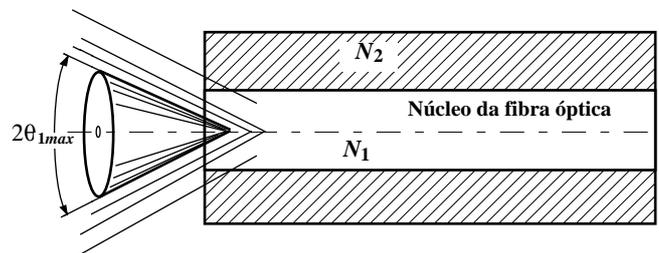


**Figura 3.** Transmissão do feixe de luz pelo núcleo da fibra óptica

Existe um valor máximo do ângulo de entrada na face da fibra, denominado ângulo de aceitação, que permitirá a propagação da energia luminosa ao longo do núcleo. Este ângulo depende dos índices de refração do núcleo e da casca e define um parâmetro denominado abertura numérica. Seu valor é calculado por<sup>[22]-[27]</sup>

$$AN = \text{sen}(\theta_{1max}) = \sqrt{N_1^2 - N_2^2} \quad (6)$$

O conhecimento da abertura numérica é importante para se descrever a energia luminosa captada e determinar-se a eficiência de acoplamento da fonte irradiante com o núcleo da fibra óptica. Será importante, também, no estudo de outras características de transmissão, como em cálculo de dispersão, na determinação da quantidade de modos de propagação, no cálculo das perdas de potência nas emendas de dois trechos de fibra, etc.. Por causa da simetria cilíndrica circular da fibra óptica, a abertura numérica define um cone de captação na sua face. (Figura 4).



**Figura 4.** Conceito de abertura numérica e ângulo de aceitação na face da fibra óptica.

Quando o raio luminoso estiver dentro desse cone, existe condições favoráveis para ser guiado pelo núcleo da fibra. Na outra extremidade, a irradiação também ocorre dentro de um cone com idênticas características geométricas. Ou seja, no final da fibra óptica tem-se uma situação simétrica à encontrada no ponto de excitação.

## VII. Modos de propagação nas fibras ópticas

As equações de Maxwell estabelecem que a transmissão de energia em guias de ondas pode ser descrita a partir de distribuições bem definidas do campo eletromagnético.<sup>[21]</sup> Cada distribuição indica um modo de propagação, com características próprias (fator de fase, velocidade de propagação, comprimento de onda guiada, velocidade de grupo, e assim por diante). Do ponto de vista da óptica geométrica, cada modo corresponde a uma trajetória diferente do raio luminoso. Em princípio, cada raio que for captado dentro do cone definido pela abertura numérica pode dar origem a um modo de propagação, com um ângulo de incidência próprio na interface do núcleo com a casca.

O campo resultante no interior da fibra é a soma de campos incidentes e refletidos, que determinam uma distribuição específica para cada caso no plano transversal à direção de propagação. Nem todos os ângulos com os quais a luz penetra na fibra poderão originar modos guiados. As trajetórias da Figura 3 representam esses modos de propagação, onde se considera apenas a parcela da energia óptica no núcleo. A luz que for emitida por regiões da fonte fora dos limites do núcleo são acopladas à casca e não

contribuem para o campo útil guiado.<sup>[22]-[27]</sup> Além disto, mesmo com a fonte de luz acoplada diretamente ao núcleo, somente os raios que incidirem com um ângulo maior ou igual ao valor crítico poderá originar um modo guiado no núcleo. Quanto maior for a abertura numérica melhor será a eficiência de acoplamento e mais modos terão condições favoráveis de propagação.

A explicação dos modos guiados empregando a óptica de raios é um método aproximado, de valor qualitativo. Uma das vantagens desta análise é permitir uma interpretação mais fácil das características de propagação. Baseia-se no fato de que a onda guiada em um determinado modo pode ser decomposta em ondas planas que constituem uma onda estacionária no plano transversal à direção de propagação. A cada onda plana associa-se um raio luminoso, com direção normal à sua frente de onda, que indica a direção em que essa onda está se deslocando. O método é aplicável quando o comprimento de onda for bem pequeno comparado com o diâmetro do núcleo da fibra e quando houver grande quantidade de modos transmitidos. A primeira exigência geralmente é satisfeita, uma vez que os comprimentos de onda para esta aplicação são em torno de 1µm e o diâmetro do núcleo é acima de 10µm.<sup>[25][27]</sup>

Esta interpretação da guiagem da onda torna-se inadequada quando o número de modos guiados for pequeno. Nesta situação, deve-se solucionar as equações de Maxwell, satisfazendo-se as condições de contorno na interface do núcleo com a casca. Esta técnica é conhecida como análise modal, sendo útil para os estudos dos fenômenos de coerência e interferência e para se determinar as amplitudes dos campos dos vários modos. Isto será necessário na análise da excitação de determinados modos ou no estudo do acoplamento entre modos, possível de ocorrer devido às imperfeições microscópicas existentes no percurso de propagação.<sup>[27]</sup>

Admitindo que sejam satisfeitas as condições para se aplicar a óptica geométrica, identificam-se dois tipos de raios no núcleo: os raios meridionais e os raios inviesados. Os raios meridionais são confinados aos planos que passam pelo eixo longitudinal do guia óptico. Parte desses raios incide na interface do núcleo com a casca com um ângulo superior ao ângulo crítico e representarão, em sua maioria, a energia guiada através do núcleo. São os raios captados na face de entrada até o ângulo determinado pela abertura numérica da fibra óptica. A Figura 3 utiliza os raios meridionais para explicação do conceito de modos guiados.

Os raios inviesados tendem a seguir um percurso inclinado dentro do núcleo.<sup>[28]</sup> A formação destes raios depende da maneira pela qual a luz é introduzida na fibra. A cada reflexão na fronteira entre o núcleo e a casca ocorre uma mudança de direção  $2\gamma$  onde  $\gamma$  é o ângulo entre a projeção do raio luminoso no plano transversal da fibra e o raio do núcleo no ponto de reflexão. O feixe de luz não cruza o eixo longitudinal da fibra, mas representa uma parte da energia guiada pelo núcleo. O ponto em que o raio inviesado emerge da fibra óptica dependerá da quantidade de reflexões ao longo da trajetória de transmissão. Para uma excitação com fonte óptica não uniforme existirão muitos pontos por onde saem esses raios. A consequência é um campo óptico distribuído de maneira mais uniforme do que com os raios meridionais. Cada um dos raios inviesados está, também, associado a um ângulo máximo de captação na face da fibra óptica. Este valor pode ser determinado por

$$\text{sen}\theta_{1a} = \frac{AN}{\cos\gamma} \quad (7)$$

onde  $AN$  é a abertura numérica e a expressão demonstra que o ângulo máximo de captação do raio inviesado é maior do que o limite fixado para os raios meridionais. Como o valor típico da abertura numérica das fibras práticas é da ordem de 0,2 e teoricamente é possível atingir o limite de  $\theta_{1a} = 90^\circ$ , o ângulo  $\gamma$  chega a  $78^\circ$ , indicando uma mudança de direção de  $156^\circ$  a cada reflexão do raio inviesado na interface do núcleo com a casca.

A quantidade de modos propagantes aumenta com o aumento do ângulo crítico na interface do núcleo com a casca. Como este valor depende da relação entre os índices de refração dos dois materiais, o número de modos também dependerá desta relação. A quantidade de modos guiados será tanto maior quanto maior for diferença relativa de índices de refração, descrita por

$$\Delta \cong \frac{N_1 - N_2}{N_1} \quad (8)$$

Costuma-se denominar modos de ordem superior aqueles cuja incidência ocorre com um ângulo próximo do ângulo crítico. Os modos de ordem inferior são os de incidência bem acima da condição de ângulo crítico, com trajetória próxima ao eixo longitudinal do guia óptico. Os modos de ordem superior tendem a transferir parte de sua energia para a casca, principalmente quando ocorrer uma dobra ou uma curva na fibra. Isto significará uma perda adicional de potência durante a transmissão.

Nos pontos de reflexão a onda refletida sofre uma defasagem em relação à onda incidente, sempre que a incidência ocorrer com um ângulo maior do que o ângulo crítico. Os modos guiados são os que resultam em interferências construtivas no núcleo, computadas as diferenças de fase causadas pela reflexão e pelo percurso da onda. Dependendo do ângulo de incidência, a interferência construtiva ocorre na casca, representando modos de casca ou modos de irradiação. Não serão úteis para a transmissão de mensagens pela fibra óptica.

Desta análise, deduz-se que existe uma quantidade finita de modos possíveis e úteis na transmissão por fibra óptica. Para se determinar este número, define-se um parâmetro denominado diâmetro normalizado ou frequência normalizada ou ainda, e mais comumente, número  $V$  da fibra óptica.<sup>[23][28]</sup> É dado por

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \left\{ N_1^2 - N_2^2 \right\}^{1/2} \quad (9)$$

onde  $a$  é o raio do núcleo,  $\lambda_0$  é o comprimento da luz medido no vácuo,  $N_1$  e  $N_2$  são os índices de refração do núcleo e da casca. Portanto, este parâmetro é diretamente proporcional à abertura numérica da fibra óptica.

A quantidade de modos guiados e as distribuições do campo óptico dependem das condições de lançamento da luz na face da fibra e das suas características geométricas e ópticas. Isto é, depende dos ângulos com que os raios incidem, do diagrama de irradiação da fonte de luz, dos comprimentos de onda da luz aplicada (em caso de fontes não coerentes), etc.. Se o diagrama de irradiação da fonte de luz for muito aberto, de forma que uma grande quantidade da

energia luminosa penetra na fibra com um ângulo elevado, excitam-se muitos modos de ordens elevadas, com incidência próxima do ângulo crítico. Este tipo de propagação tende a introduzir perdas de potência, principalmente em curvas e dobras da fibra óptica. Quando a fonte de luz tiver um diagrama mais estreito, a energia acoplada ao núcleo fica distribuída em modos de ordens mais baixas, permitindo uma transmissão com menor perda de potência. Ainda que a fonte de luz tenha um diagrama bem estreito, um desalinhamento em relação ao eixo da fibra pode dar origem a modos de ordens elevadas, com as conseqüências discutidas.

À medida em que o campo óptico for se propagando a distribuição de energia entre os modos pode alterar-se, por causa do acoplamento entre eles. Depois de algumas centenas de metros esta conversão de modos torna-se insignificante, atingindo-se uma distribuição estável de energia entre os modos. Logo, ainda que continue ocorrendo a conversão de modos, a quantidade de energia final para cada um ficará substancialmente inalterada desse ponto em diante.

### VIII. Tipos básicos de fibras ópticas

Em geral, as fibras são fabricadas obedecendo determinados critérios de variação para os índices de refração do núcleo e da casca. Segundo especificações da Electronic Industries Association (EIA) norte-americana<sup>[29]</sup> estes parâmetros obedecem às expressões

$$N(r) = N_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^g} \cong N_1 \left[1 - \Delta \left(\frac{r}{a}\right)^g\right] \quad (10)$$

para a região do núcleo,  $r \leq a$ ,

$$N_2 = N_1 \sqrt{1 - 2\Delta} \cong N_1(1 - \Delta) \quad (11)$$

para a região da casca,  $r \geq a$ , com  $\Delta$  dado por

$$\Delta = \frac{(N_1^2 - N_2^2)}{2N_1^2} \cong \frac{N_1 - N_2}{N_1} \quad (12)$$

sendo  $N_1$  o máximo índice de refração do núcleo, correspondendo ao valor em seu centro,  $N_2$  é o índice de refração da casca,  $a$  é o raio do núcleo e  $r$  é a distância radial medida a partir do eixo longitudinal do núcleo.

A lei de variação está na dependência do expoente  $g$  da relação  $(r/a)$  e do valor de  $\Delta$ . Este último parâmetro é muito menor do que a unidade, uma vez que os índices de refração do núcleo e da casca são quase iguais. Desta maneira, as relações podem ser aproximadas das formas indicadas sem erros apreciáveis.

Quando  $g = 1$  o índice de refração varia de forma praticamente linear com a distância radial. Para  $g \rightarrow \infty$  o índice salta bruscamente de um valor constante no núcleo para o valor especificado na casca. Representa a fibra óptica com índice em degrau. Para  $g = 2$  tem-se uma fibra com índice de perfil parabólico. Valores finitos para o expoente  $g$  identificam fibras com índices graduais no núcleo. Com o valor  $g \cong 2$  a fibra óptica apresentará uma focalização periódica para a luz emitida a partir de uma fonte divergente em sua entrada.<sup>[10]</sup> O guia óptico age como se possuísse um

sistema contínuo de lentes que refocaliza o feixe luminoso à medida em que se propaga pelo núcleo. O processo de refocalização tende a equalizar os comprimentos dos diversos percursos. Desta maneira, as velocidades de grupo dos modos ficam com um valor aproximadamente igual para todos.<sup>[25][27]</sup>

O valor ótimo para o expoente  $g$  é ajustado em função da dispersão mínima desejada, com o objetivo de se conseguir a máxima largura de banda da fibra óptica.<sup>[27][28][30]</sup> Alguns modelos de fibras ópticas estão representados na Figura 5.

A classificação conforme a variação de índice de refração não define completamente todas as propriedades das fibras ópticas. As características de propagação dependem da lei de variação do índice de refração do núcleo e também da variedade de modos guiados. Nas fibras multimodos (MMF) o núcleo possui um diâmetro bem grande comparado ao comprimento de onda da luz guiada. Na fibra monomodo (SMF) o diâmetro do núcleo é bem menor e apenas um modo é transmitido, podendo ocorrer duas polarizações ortogonais da onda guiada. O comportamento da fibra como multimodo ou monomodo depende dos parâmetros ópticos (índices de refração, abertura numérica, lei de variação do índice de refração do núcleo, etc.), do comprimento de onda guiada, do diâmetro do núcleo. Estas são grandezas reunidas no parâmetro  $V$  da fibra óptica.

Para a fibra com índice em degrau ser classificada como monomodo é necessário que

$$V < 2,405 \quad (13)$$

e o projeto desta fibra exige ou uma redução no diâmetro do núcleo ou na diferença entre os índices de refração de núcleo e de casca. Fibras monomodos disponíveis comercialmente apresentam diâmetros do núcleo da ordem de  $10\mu\text{m}$ . A fibra multimodo exige  $V > 2,405$  para o comprimento de onda especificado. O comprimento de onda que representa o limiar entre a condição de propagação de modo único e de propagação multimodo é denominado comprimento de onda de corte ( $\lambda_c$ ). Para comprimentos maiores apenas um modo pode ser transmitido pelo núcleo. Pode ser demonstrado que para  $V \gg 2,405$  em uma fibra de índice em degrau a quantidade de modos guiados torna-se

$$N_m \cong \frac{V^2}{2} \quad (14)$$

Nas fibras com perfil gradual de índice de refração do núcleo a quantidade de modos guiados dependerá do valor do expoente  $g$ . Nestes casos, costuma-se definir um valor efetivo para  $V$ , calculado a partir da expressão:<sup>[31]</sup>

$$V_{ef}^2 = 2 \left(\frac{2\pi}{\lambda_o}\right)^2 \int_0^a \{ [N(r)]^2 - N_2^2 \} r dr \quad (15)$$

sendo  $\lambda_o$  o comprimento de onda no vácuo. A quantidade de modos guiados dependerá do valor encontrado nesta integração, substituído na Equação (14). Em termos aproximados, a quantidade de modos guiados pela fibra com índice gradual é dado por uma das seguintes expressões:<sup>[25]</sup>

$$N_m \cong \frac{1}{2} \frac{g}{(g+2)} V^2 \quad (16)$$

onde  $V$  é o valor máximo do diâmetro normalizado e

$$N_m \cong \frac{2g}{g+2} \left( \frac{\pi a}{\lambda} \right)^2 (AN)^2 \quad (17)$$

sendo  $AN$  a abertura numérica tomada em relação ao centro do núcleo.

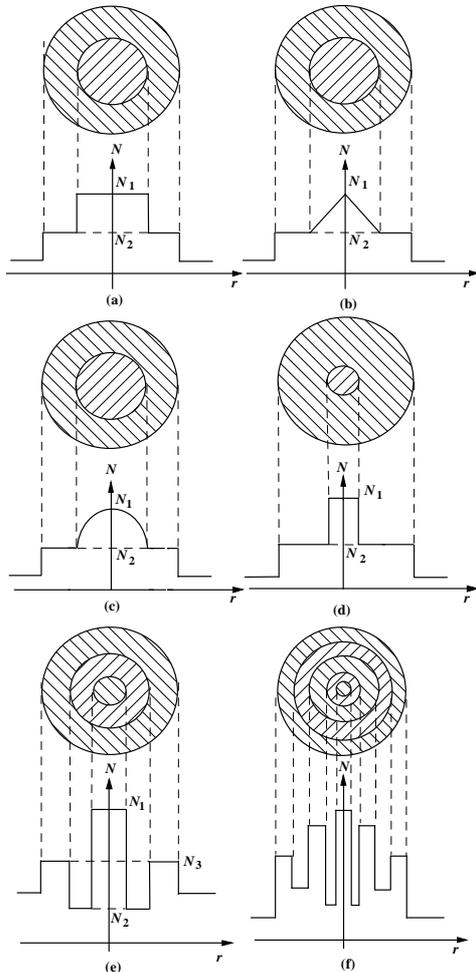
Com base nas relações discutidas, a quantidade de modos guiados na fibra com índice gradual pode ser expressa como

$$N_m = \frac{g \Delta}{g+2} \left[ \frac{2\pi a N_1}{\lambda} \right]^2 \quad (18)$$

onde  $N_1$  e  $\Delta$  são valores referenciados ao centro do núcleo. Uma comparação entre as expressões para a fibra com índice gradual e para a fibra com índice em degrau de mesmo diâmetro de núcleo mostra que se  $g \cong 2$  a primeira transmite a metade dos modos da segunda. Isto terá uma consequência benéfica sobre a dispersão do sinal guiado, permitindo uma maior largura de banda e uma maior taxa de transmissão.

### IX. Descrição geral das causas de atenuação na fibra óptica

Para as extensões envolvidas nos enlaces ópticos, a perda de potência determinará a distância entre os repetidores ou entre os amplificadores ópticos. Esses equipamentos intermediários representam uma parcela substancial do custo final do sistema. Por conseguinte, o investimento total será fortemente influenciado pelos fatores responsáveis pela degradação do sinal óptico.



**Figura 5.** Categorias de fibras ópticas. (a) Fibra com índice em degrau. (b) Fibra com índice de refração gradual linear. (c) Fibra com índice parabólico. (d) Fibra monomodo de índice em degrau. (e) Fibra de índice em W. (g) Fibra com cobertura quádrupla.

Há uma exigência rigorosa sobre o controle das perdas de potência em um enlace óptico, justificado pelos baixos níveis de potência a serem manipulados. Não raramente a potência introduzida no início da fibra é da ordem de alguns microwatts e uma atenuação exagerada tornaria o sinal de chegada na outra extremidade difícil de ser aproveitado para fins de comunicações. Portanto, uma fibra óptica com grandes perdas exigiria um aumento na quantidade de repetidores. O conhecimento das origens da atenuação é importante para se estabelecerem as formas de controle adequadas. Entre as causas mais importantes citam-se a absorção pelo material, irradiação devido a curvaturas, espalhamento pelo material, perdas por modos vazantes, perdas por microcurvaturas, atenuações em emendas e conectores, perdas por acoplamento no início e final da fibra. Em meios homogêneos, estas perdas fazem com que a amplitude do campo eletromagnético decresça exponencialmente com a distância percorrida.

Os parâmetros que influem na atenuação global da fibra óptica relacionam-se à qualidade na sua fabricação, ao comprimento de onda da luz guiada, ao grau de pureza do material utilizado, à perfeição das emendas e dos conectores, e assim por diante.<sup>[10][26][32][33]</sup> Muitas dessas causas estão com valores bem reduzidos atualmente, graças ao extraordinário avanço nos processos de fabricação, aos novos equipamentos para emendas e aos modernos recursos para a montagem e instalação dos cabos ópticos.

A perda devida à absorção ocorre por que uma parcela da potência óptica guiada é dissipada sob a forma de calor, tanto no núcleo quanto na casca. A proporção correspondente a cada parte é determinada pela proporção entre os campos existentes nessas duas regiões. As causas dessa perda são as vibrações das moléculas e a transição de elétrons entre os níveis de energia do meio. Em frequências próximas das vibrações naturais destes componentes o campo eletromagnético transfere energia a eles, reforçando suas oscilações. A absorção por parte das moléculas e íons, de maior massa do que os elétrons, ocorre em frequências de infravermelho.

As maiores interações do feixe óptico com as moléculas do meio ocorrem em comprimentos de onda superiores a  $7\mu\text{m}$ , mas sua influência estende-se até os valores que interessam para as comunicações ópticas. Os elétrons são responsáveis pela perda que ocorre nas proximidades do ultravioleta quando forem excitados por fótons de alta energia e ocorrer a transição para estados de energia mais altos.<sup>[34]</sup> A quantidade de potência absorvida decresce exponencialmente com o aumento do comprimento de onda. A razão deste decréscimo é que maiores comprimentos de onda indicam fótons de menor energia, as vezes insuficiente para transferir elétrons entre duas bandas de energia do material.<sup>[35]</sup> Em geral, o nível mais severo de absorção ocorre nos comprimentos de onda entre  $0,1\mu\text{m}$  e  $0,3\mu\text{m}$ , sendo acentuadamente mais fraco entre  $0,3\mu\text{m}$  e  $1\mu\text{m}$ .

Além dos mecanismos descritos, que estão presentes mesmo em vidros perfeitamente purificados, desde o início da produção de fibras ópticas verificou-se que íons de impureza que existirem no meio de propagação são causas importantes de perda pela absorção de energia da onda guiada.<sup>[10]</sup> Uma

concentração de impurezas em valores tão baixos quanto algumas partes por milhão ou algumas partes por bilhão podem conduzir a atenuações consideráveis.<sup>[36]</sup> Além dos íons metálicos, os íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) são também responsáveis por perda de potência pela absorção, como já se antecipou. As maiores perdas, neste caso, ocorrem em 720nm, 820nm, 945nm e 2,73 $\mu\text{m}$ .<sup>[36]-[39]</sup> Felizmente, com as técnicas mais recentes de fabricação tem-se conseguido graus de pureza tão grandes que algumas fibras apresentam perdas por absorção quase insignificantes. Este resultado foi conseguido com fibras monomodo nos comprimentos de onda de 1,3 $\mu\text{m}$  e 1,55 $\mu\text{m}$ .<sup>[39]</sup> Técnicas modernas de fabricação, com modificações na dopagem do núcleo e na forma de distribuição do índice de refração, já permitiram o desenvolvimento de fibras que apresentam uma grande faixa de comprimentos de onda em que se consegue perdas inferiores a 0,3dB/km entre 1 $\mu\text{m}$  e 1,7 $\mu\text{m}$ .<sup>[28][40]</sup>

Na curvatura de uma fibra óptica podem ser originados modos de ordens superiores, que são mais fracamente guiados do que os de ordem mais baixa. A análise com a óptica geométrica, mostra uma incidência com ângulo muito próximo do ângulo crítico ou mesmo inferior a ele e a energia da luz é transferida para a casca. Este tipo de perda foi previsto teoricamente por Marcatilli e Miller<sup>[41]</sup> e comprovado experimentalmente logo no início da produção das fibras ópticas. Apenas uma fibra perfeitamente reta estaria livre desta perda durante a transmissão. Uma curvatura suave, porém, terá influência muito pequena sobre o campo guiado.<sup>[28]</sup>

Na interface do núcleo com a casca o campo guiado deve satisfazer as condições de contorno, exigidas pelas leis da teoria eletromagnética. Estas condições estabelecem que a componente tangencial do campo elétrico e a componente tangencial do campo magnético da luz guiada sejam contínuas nesta fronteira de separação entre os dois meios.<sup>[21]</sup> Isto exige um ajuste automático da velocidade de propagação do campo fora do núcleo ao se encurvar a fibra. Entretanto, a uma certa distância crítica, para que as condições de contorno sejam satisfeitas, a velocidade do campo deve ser igual à velocidade da luz, por causa da maior trajetória percorrida no mesmo intervalo de tempo. Por conseguinte, o campo de um modo guiado puro, contido em uma distância maior do que o valor crítico deveria propagar-se na casca com uma velocidade superior à velocidade da luz no vácuo. Como isto não é fisicamente possível, significa que para uma distância radial maior do que o valor crítico o campo não pode ser constituído somente por modos guiados, surgindo os modos de irradiação. Portanto, uma parcela da energia óptica é perdida para o ambiente externo. Nas fibras multimodos, primeiramente ocorre a irradiação nos modos de ordens superiores, que se propagam mais próximos da casca. Para as fibras monomodos, a perda diminui quando se transmite a luz próxima do comprimento de onda de corte.

A perda por irradiação é diretamente proporcional ao comprimento de onda da luz e inversamente proporcional à relação  $(N_1^2 - N_2^2)/N_1^2$ .<sup>[28]</sup> Consequentemente, estas perdas serão reduzidas quando a fibra for fabricada com uma maior diferença entre os índices de refração do núcleo e da casca e quando operarem em comprimentos de onda menores. Esta perda pode ser desconsiderada para os modos de ordem mais baixa, que estão fortemente confinados ao núcleo da fibra. De uma maneira geral, os valores críticos para os raios de

curvatura são pequenos.<sup>[28]</sup> Em condições normais de instalação e nas caixas de emendas das fibras a curvatura é feita com um raio de vários centímetros e o acréscimo de perda na transmissão não é importante.

Outro mecanismo de perda é o espalhamento da energia óptica, que incluem reduções na amplitude do campo guiado por mudanças na direção de propagação, causadas pelo próprio material e por imperfeições no núcleo da fibra. Citam-se a dispersão linear de Rayleigh, a dispersão de Mie, a dispersão estimulada de Raman e o espalhamento estimulado de Brillouin. O espalhamento linear refere-se a transferência de uma parcela da luz de um modo de propagação para outros, quando a quantidade de energia transferida for diretamente proporcional à potência da luz guiada. Os novos modos podem ser do tipo de irradiação ou modos muito fracamente guiados, de forma que a luz escapa para a casca.

Para se justificar este fato, considera-se que as irregularidades agem como se fossem pontos diferentes do meio, dispostos ao longo do percurso de propagação. Quando a luz incide nessas minúsculas regiões elas comportam-se como fontes secundárias de irradiação quase isotrópicas, espalhando a energia em todas direções. Usando a óptica geométrica, pode-se entender que alguns raios incidirão na fronteira entre o núcleo e a casca com um ângulo menor do que o ângulo crítico, originando os modos de irradiação, ou muito próximo a ele, excitando os modos superiores fracamente guiados.

O espalhamento linear de Rayleigh é um dos mais importantes, originado em defeitos sub-microscópicos na composição e na densidade do material. Essas alterações podem surgir durante o processo de fabricação da fibra ou em função de irregularidades próprias na estrutura molecular do vidro. As dimensões físicas e a separação desses minúsculos defeitos são bem pequenas comparadas ao comprimento de onda da luz no meio ( $\lambda/10$  ou menor). O resultado é uma flutuação no valor do índice de refração do material ao longo da fibra. As irregularidades decorrentes da composição do vidro têm sido controladas por um aperfeiçoamento dos processos de fabricação. Mas as originadas por diferenças de densidade do material são intrínsecas ao vidro e não podem ser evitadas. Portanto, se pudesse ser construída uma fibra óptica absolutamente perfeita em termos de pureza, a perda de potência por este espalhamento persistiria. Logo, esta atenuação representa o limite mínimo teoricamente possível para a perda na fibra óptica. O valor final da atenuação por ele causada é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda e é independente da amplitude do campo óptico guiado.<sup>[28][35]</sup>

Uma das conseqüências deste fenômeno é a luz retroespalhada, originando uma onda eletromagnética que se reflete em direção ao início da fibra óptica. Como este fato é permanente, mesmo em fibras de fabricação perfeitamente controlada, foram desenvolvidos métodos e equipamentos capazes de utilizá-lo na determinação da perda de potência, do comprimento físico da fibra, na localização de defeitos, na análise de qualidade de emendas, etc.. Um desses equipamentos, de uso bastante comum, é o refletômetro óptico no domínio do tempo, conhecido pela sigla em inglês OTDR (*optical time domain reflectometer*).<sup>[22][42][43]</sup>

O espalhamento linear de Mie pode ser observado quando as irregularidades da fibra têm dimensões comparáveis ao comprimento de onda da luz. Tipicamente, quando as imperfeições forem maiores do que  $\lambda/10$ . Essas imperfeições

são originadas por bolhas, minúsculos defeitos na interface do núcleo com a casca, variações no diâmetro da fibra, sinuosidades no eixo conhecidas como microcurvaturas<sup>[44]</sup>, variações na relação entre o índice de refração do núcleo e o índice da casca ao longo da fibra, e assim por diante. Por estes fatos podem ocorrer espalhamentos do feixe óptico dependentes do ângulo de incidência. As sinuosidades no eixo longitudinal são causadas por forças laterais que agem na superfície externa da fibra. Representam um dos principais causadores do espalhamento de Mie e são responsáveis por um acréscimo significativo da atenuação global.

O espalhamento estimulado de Raman e o estimulado de Brillouin são efeitos originados por elevados campos elétricos da luz transmitida no núcleo. Esses fenômenos exigem um alto valor da intensidade óptica dentro do núcleo e só ocorrem quando a potência guiada ultrapassa um certo limite mínimo. As distorções causadas no campo óptico indicam o aparecimento de frequências diferentes das aplicadas no início da fibra. Por isto, uma parcela da energia é transferida de um modo para outro, em uma frequência diferente, ou mesmo acoplada ao modo original. Os efeitos são observados em fibras monomodos de grandes comprimentos físicos. Nas fibras multimodos os núcleos são de diâmetros muito maiores e dificilmente a densidade de potência alcançará o valor crítico necessário para originar o fenômeno. Quando houver transferência de energia para uma frequência diferente, a potência contida em um comprimento de onda especificado sofrerá redução. Em algumas circunstâncias, estes efeitos podem ser empregados para fornecerem um ganho de potência na luz guiada dentro da fibra óptica.

No espalhamento estimulado de Brillouin ocorre uma modulação da luz causado pela vibração das moléculas do meio. O efeito Doppler-Fizeau resultante da interação da luz com as vibrações do meio faz surgir bandas laterais, separadas da frequência original pela frequência de vibração do meio. A elevada densidade de potência óptica, isto é, grande quantidade de fótons por unidade de tempo por unidade de superfície, forçará o aparecimento de vibrações mecânicas a nível molecular. A interação com a luz guiada causará um espalhamento, que dependerá do ângulo de incidência em relação aos planos de vibração do meio. Parte da energia do comprimento de onda original é transferida a essas bandas laterais. O máximo de desvio da frequência ocorre no sentido oposto ao originalmente estabelecido na fibra óptica. Isto é, o espalhamento de Brillouin é um fenômeno que excita uma onda retrógrada na fibra. É possível percebê-lo quando a potência aplicada ao núcleo ultrapassa o valor de alguns miliwatts.

O efeito referido como espalhamento estimulado de Raman implica em transferência da energia em bandas laterais mais separadas em relação ao comprimento de onda original. O efeito dominante é no sentido direto da propagação e acontece quando a potência aplicada for bastante grande, da ordem de 10 a 1000 vezes a do espalhamento de Brillouin. Portanto, quando os níveis ópticos não forem elevados, as consequências desta dispersão não são significativas. Em sistemas modernos de comunicações, com enlaces de grandes comprimentos, que exigem valores maiores de potência, muitas vezes com mais de um comprimento de onda no núcleo, o campo óptico pode ser suficientemente elevado para forçar a fibra a operar em regiões não lineares. Neste caso, as dispersões não lineares tornam-se importantes pela redução no

nível do sinal na transferência de energia para as faixas laterais indesejáveis e por outros efeitos que estarão presentes na transmissão.

Mesmo quando os níveis de potência são insuficientes para causar os espalhamentos estimulados, pode ocorrer outro tipo de dispersão linear. As causas são a variação no diâmetro do núcleo e a modificações na diferença entre os índices de refração do núcleo e da casca ao longo da fibra. Essas irregularidades podem originar modos de ordens superiores fracamente guiados que se irradiam para a casca. O fato é mais perceptível na parte inicial da fibra multimodo. Felizmente, por causa da transferência de potência entre os modos guiados haverá uma distribuição de energia entre eles que tende a se estabilizar após algumas dezenas de metros de propagação.

Uma parte da energia guiada pode assumir um percurso helicoidal, como se descreveu na apresentação dos modos inviesados, que têm trajetória de propagação oblíqua no núcleo. Uma interpretação segundo os conceitos da óptica geométrica mostra que, ao girar radialmente, em algum ponto essa componente terá o ângulo de incidência abaixo do valor crítico. A energia da onda vai sendo gradativamente transferida para fora do núcleo. Esta forma de propagação é denominada modos vazantes (*leaking modes*) e também representará uma perda adicional de potência da onda guiada. O fenômeno é semelhante ao causado pela curvatura da fibra, mas ocorre ao longo de sua circunferência. Representa uma perda associada mesmo a fibras perfeitamente retas.<sup>[45]</sup> Em fibras com diâmetro normalizado de pequeno valor os modos vazantes irradiam rapidamente e só são observáveis nas proximidades da fonte de irradiação. Quando o número  $V$  for muito grande há muitos modos deste tipo e pode haver um vazamento superior a 50% dos modos guiados no primeiro quilômetro de propagação. Para as fibras multimodos com  $V \leq 100$ , os modos vazantes representam de 5% a 10% do total de modos excitados no núcleo.<sup>[40]</sup>

As minúsculas imperfeições conhecidas como microcurvaturas têm forma e distribuição aleatórias. Mesmo quando esses defeitos forem tão pequenos quanto um comprimento de onda ou ainda menor, responderão por um aumento na perda da potência guiada. Esta atenuação pode variar com a temperatura e com o esforço de tração no cabo de fibra óptica durante o processo de instalação.<sup>[46]</sup> Outro fator de influência é decorrente das variações na abertura numérica ao longo da fibra. Verificou-se um efeito diretamente proporcional ao quadrado da relação entre o raio do núcleo e o raio da casca e inversamente proporcional à quarta potência da abertura numérica. Nos processos modernos de fabricação, proteção e instalação dos cabos ópticos, os fatores externos que contribuem para esta forma de atenuação estão bastante reduzidos e esta perda está bem controlada, principalmente nas fibras multimodos. Em fibras monomodos a atenuação depende do comprimento de onda. A experiência sugere que não se deve operar com valores superiores a 30 % do comprimento de onda de corte, para manter esta perda em patamares aceitáveis.

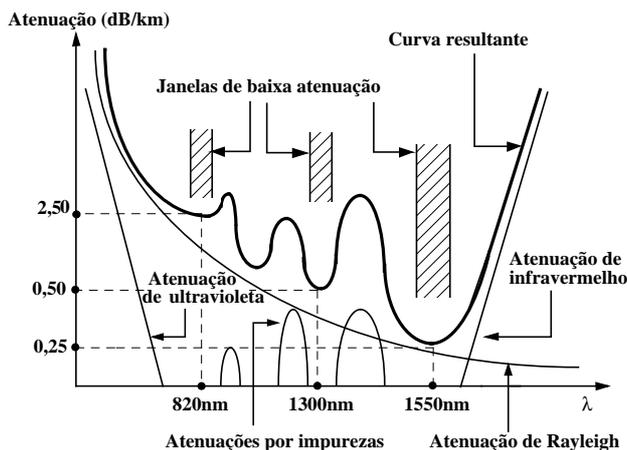
Pelas descrições, os mecanismos de perda são dependentes do comprimento de onda da luz guiada. Por causa da absorção causada pelas vibrações dos elétrons, em comprimentos de ondas menores, e das vibrações de íons de impureza e moléculas, na região do infravermelho, haverá um aumento na atenuação nestas duas regiões do espectro óptico. Em toda faixa útil para comunicações, o efeito predominante

é a atenuação pelo espalhamento de Rayleigh. As impurezas, quando existirem, ocasionam aumento maior de perda em determinados comprimentos de onda, produzindo picos localizados de atenuação. De uma maneira geral, a atenuação total da fibra óptica em condições normais de operação, sem sofrer curvaturas exageradas e sem a influência de irradiações que possam alterar sua transparência, pode ser resumida em uma expressão do tipo

$$L_t(\lambda) = \frac{S_R}{\lambda^4} + Af_a(\lambda) + \frac{B_n}{(AN)^6} \quad (19)$$

sendo as constantes  $S_R$ ,  $A$  e  $B_n$  específicas para cada tipo de fibra.

A primeira parcela desta equação refere-se à perda causada pela dispersão de Rayleigh, o segundo termo inclui um fator devido à absorção e a terceira parcela representa a perda pelas microcurvaturas. A Figura 6 mostra um perfil de variação típico de atenuação em função do comprimento de onda conseguido em fibras multimodos. Para as recentes tecnologias de fabricação, os picos de atenuação praticamente desapareceram, de modo que entre 1,2μm e 1,7μm tem-se baixa atenuação em toda a faixa. Na figura estão destacadas as janelas de baixa atenuação com os valores disponíveis comercialmente de perda por quilômetro de transmissão.



**Figura 6.** Atenuação espectral típica em uma fibra óptica de tipo multimodo. Estão indicadas as janelas de baixa atenuação, com os valores típicos de perda por quilômetro de propagação.

A maior parte das fibras monomodos operam no comprimento de onda de 1,3μm, onde apresenta baixa perda e pequena dispersão do sinal óptico guiado. A faixa de 1,55μm apresenta perda de potência menor ainda, mas apresenta limitações em termos de dispersão. Sua importância cresceu muito a partir do momento em que se desenvolveram os amplificadores a fibra óptica dopada com érbio. Isto motivou o aperfeiçoamento de guias ópticos com baixa dispersão também neste comprimento de onda.<sup>[47][48]</sup>

## X. Dispersões nas fibras ópticas

A dispersão é associada ao fato de que os modos de propagação são transmitidos através da fibra óptica com velocidades diferentes. Portanto, atingem a extremidade de chegada em intervalos de tempo diferentes. A consequência é que o sinal óptico, além da redução na amplitude, sofre um

alargamento temporal em relação ao sinal emitido no início da fibra. A luz modulada com uma seqüência de pulsos pode apresentar um erro na extremidade de chegada, com a superposição de pulsos vizinhos deformados durante a propagação. A forma de se reduzir este inconveniente seria separar mais os pulsos no domínio do tempo, implicando em uma redução na quantidade transmitida por segundo. Isto é, reduzindo-se a taxa de transmissão do sistema. Portanto, a dispersão é um sério inconveniente, que limita a capacidade do sistema, refletindo-se no número possível de mensagens a serem enviadas.

Na análise de sinais, verifica-se que um sistema não apresenta distorções na transmissão se forem satisfeitas duas condições simultaneamente: o módulo da função de transferência deve ser independente da frequência e o argumento da função de transferência deve variar linearmente com a frequência. Nos sistemas, nos equipamentos e nos meios de transmissão reais é quase impossível que estas condições sejam cumpridas em todas as frequências. Logo, uma transmissão por fibra óptica procura aproximar-se destas exigências, ao menos nos comprimentos de onda de interesse. Para tanto, é importante que se conheçam os mecanismos responsáveis pelas dispersões. Alguns destes fatos já foram antecipados porque também são causas de atenuação na fibra óptica.

Foi demonstrada a possibilidade da propagação no núcleo da fibra óptica por diversos percursos, dependendo do diâmetro em relação ao comprimento de onda da luz guiada, da abertura numérica e do perfil do índice de refração. Cada percurso determina um modo de propagação. Quanto maior a abertura numérica, melhor será o acoplamento entre a fonte de luz e o núcleo e mais modos serão transmitidos nos núcleos de grandes diâmetros. Esta dependência fica clara ao se analisar o crescimento do número  $V$  e o correspondente aumento na quantidade de modos guiados. A existência de muitos modos dá origem à dispersão modal no sinal transmitido, também conhecida como dispersão intermodal, dispersão multipercurso, dispersão multimodo ou ainda dispersão monocromática. A última designação deve-se ao fato de que a distorção do sinal guiado existirá ainda que a fonte de luz fosse absolutamente coerente, irradiando apenas um comprimento de onda. É evidente que com a existência de muitas trajetórias, como na Figura 3, cada modo alcança a extremidade da fibra em instantes diferentes. A máxima diferença de tempo entre os percursos ocorrerá entre um modo que se propaga paralelamente ao eixo da fibra e o raio que incide na fronteira entre o núcleo e a casca com um ângulo igual ao valor crítico. Na fibras com índice em degrau, seu valor será dado por

$$\Delta t = \frac{N_1 L(N_1 - N_2)}{c N_2} \quad (20)$$

onde se percebe que esta dispersão aumenta com a abertura numérica e com o comprimento do enlace ( $L$ ), resultando em uma menor largura de banda para a transmissão das informações.

Para as fibras multimodos de índice de refração gradual por causa da equalização nos percursos dos raios luminosos tem-se uma redução na diferença de tempo de chegada para os vários modos. O valor total da dispersão é dado aproximadamente por

$$\Delta t \cong \frac{L N_1 \Delta}{2c} \left( \frac{g}{g+1} \right) \left( \frac{g+2}{3g+2} \right)^{1/2} \left( \frac{g-2-e}{g+2} \right)^2 \quad (21)$$

onde  $g$  é o expoente que determina o perfil de variação do índice do núcleo,  $N_1$  é o índice de refração no centro do núcleo e  $\Delta$  é a variação relativa do índice de refração. O parâmetro  $e$  é um número bem pequeno, correspondente à relação

$$e = -\frac{2n}{N_1} \frac{\lambda}{\Delta} \frac{d\Delta}{d\lambda} \quad (22)$$

Na Equação (21), nota-se que se o valor de  $g$  for ajustado para  $g = e + 2$  a dispersão modal tende para zero em um comprimento de onda especificado. Sendo o valor de  $e$  muito pequeno, conclui-se que nas fibras com índice gradual de perfil aproximadamente parabólico esta dispersão fica bastante reduzida em relação às fibras de índice em degrau. Tipicamente, a dispersão multimodo nessas fibras apresenta um valor da ordem de algumas dezenas de nanossegundos por quilômetro de propagação no comprimento de onda de 850nm.

O material que constitui o núcleo da fibra óptica apresenta índice de refração variável com o comprimento de onda guiado. Nos compostos de dióxido de silício, o índice de refração diminui com o aumento de  $\lambda$ . Desta maneira, se a fonte de luz não for absolutamente coerente e possuir uma largura espectral  $\Delta\lambda$ , ocorrem diferenças entre os tempos de propagação, mesmo dentro de um único modo, resultando no fenômeno conhecido como dispersão de material ou dispersão intramodal. A velocidade de grupo é o inverso da taxa de variação do fator de fase do modo ( $\beta$ ) com a frequência angular:

$$v_g = \left( \frac{d\beta}{d\omega} \right)^{-1} \quad (23)$$

onde  $\beta$  representa a variação de fase por unidade de deslocamento da onda. É relacionado ao comprimento de onda e ao índice de refração do meio por

$$\beta = \frac{2\pi N}{\lambda} \quad (24)$$

Derivando-se  $\beta$  em relação ao comprimento de onda e considerando que a frequência angular é  $\omega = 2\pi(c/\lambda)$ , obtém-se

$$\frac{d\beta}{d\omega} = \frac{1}{c} \left[ n - \lambda \frac{dN}{d\lambda} \right] = \frac{1}{v_g} \quad (25)$$

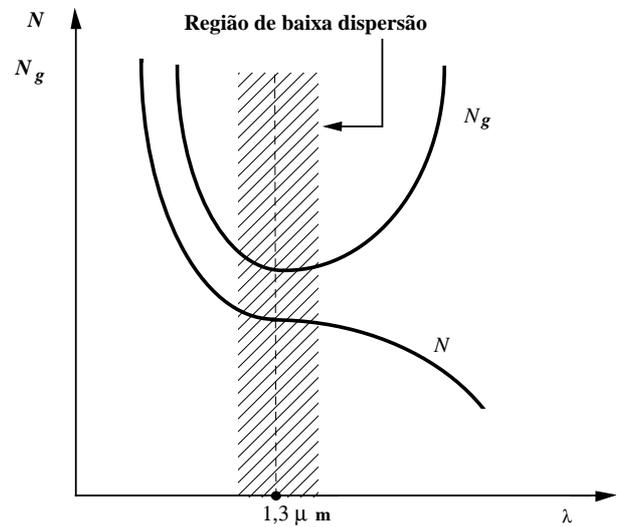
A relação entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade de grupo do sinal guiado representa o índice de refração de grupo:

$$N_g = \frac{c}{v_g} = N - \lambda \frac{dN}{d\lambda} \quad (26)$$

que é ligeiramente maior do que o índice de refração próprio do núcleo, uma vez que  $N$  diminui com o aumento de  $\lambda$  dando à derivada um sinal negativo. A comparação entre os dois índices de refração está na Figura 7. Os valores numéricos dependerão da dopagem empregada na composição do vidro utilizado no núcleo. Na faixa de comprimento de onda de

interesse para comunicações ópticas o valores dos índices de refração estarão entre 1,52 e 1,40.<sup>[5][17][27][49]</sup>

Este gráfico demonstra que o índice de refração de grupo assume valor mínimo e sensivelmente constante em comprimentos de onda ao redor de 1,3 $\mu$ m. Então, os diversos comprimentos de onda em torno deste valor propagam-se aproximadamente com a mesma velocidade e a dispersão intramodal tende para um valor quase nulo. Em comprimentos de onda ao redor de 850nm uma fonte de luz com largura espectral  $\Delta\lambda = 40$ nm, valor típico para os diodos emissores de luz modernos, pode dar origem a uma dispersão deste tipo da ordem de 4ns/km. Isto contribui para uma forte redução na largura de banda útil do sistema. A descoberta desta propriedade de baixa dispersão em torno da segunda janela de transmissão<sup>[17]</sup> motivou a busca de fontes de luz de alta coerência, que garantiram a possibilidade de se aumentar a quantidade de bits transmitidos por unidade de tempo. São disponíveis lasers a semicondutores com realimentação distribuída que, neste comprimento de onda central, apresentam largura espectral inferior a 0,1nm.<sup>[27][28]</sup>



**Figura 7.** Variação do índice de refração do material e do índice de refração de grupo para o material do núcleo da fibra óptica. Observa-se a faixa de comprimento de onda na qual o índice de refração de grupo é mínimo e apresenta uma variação quase nula.

Conhecida a influência do comprimento de onda sobre o índice de refração, há necessidade de se verificar de que maneira a largura espectral da fonte óptica pode influir sobre a dispersão do pulso. O alargamento temporal será determinado por

$$\Delta t = \frac{d t}{d \lambda} \Delta \lambda \quad (27)$$

onde a derivação em relação ao comprimento de onda mostra como o tempo de propagação varia em relação ao comprimento de onda. O intervalo de tempo necessário para o sinal propagar em um comprimento  $L$  da fibra é calculado dividindo-se esta distância pela velocidade de grupo:

$$t = \frac{L}{v_g} = \frac{L}{c} \left[ N - \lambda \frac{dN}{d\lambda} \right] \quad (28)$$

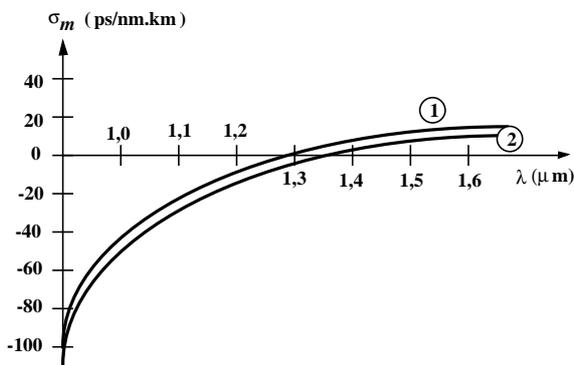
Derivando-se em relação ao comprimento de onda encontra-se o valor para o cálculo do alargamento do pulso, causado pela variação do comprimento de onda da luz entregue à fibra óptica. Sem dificuldades, o resultado procurado é

$$\Delta t = - \left[ \frac{L}{c} \lambda \frac{d^2 N}{d\lambda^2} \Delta\lambda \right] \quad (29)$$

que se aproxima da situação ideal quanto menor for a segunda derivada indicada. O parâmetro que caracteriza a maior ou menor dispersão de material é definido como

$$\sigma_m = \frac{\Delta t}{L(\Delta\lambda)} = - \frac{1}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad (30)$$

medido em nanosegundos por quilômetro por unidade de largura espectral da fonte de luz (ns/nm.km).



**Figura 8.** Variação do parâmetro que determina a dispersão de material em um núcleo de fibra óptica. A curva 1 refere-se à situação para a sílica pura e a curva 2 indica a possibilidade de deslocamento do ponto de dispersão nula conforme a dopagem e o perfil de variação do índice de refração.

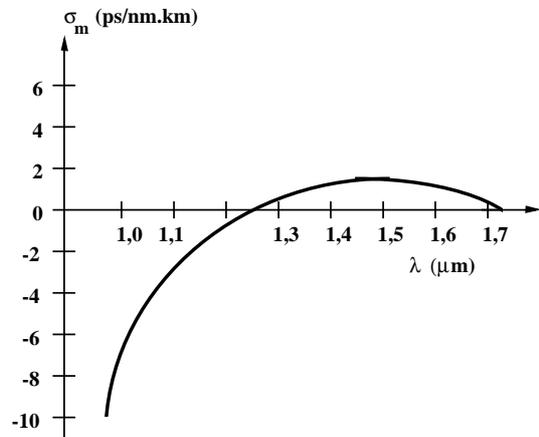
Na Figura 8 tem-se a variação típica deste parâmetro, conforme o comprimento de onda na fibra óptica. Para a sílica pura o parâmetro anula-se no comprimento de onda de 1,27 $\mu\text{m}$ .<sup>[17]</sup> Conforme a dopagem no núcleo e o perfil de variação do índice é possível deslocar-se o ponto de dispersão nula para um novo comprimento de onda, mantendo-se quase o mesmo formato da curva original.

Existe outra consideração relativa à dispersão na fibra óptica. O fator de fase em uma estrutura limitada transversalmente ( $\beta$ ) depende do comprimento de onda do sinal.<sup>[21][27][28]</sup> Ainda que o índice de refração não se altere com o comprimento de onda, o fator  $\beta$  sofreria modificações quando a fibra fosse excitada por uma fonte de luz real, alterando-se a forma do sinal na saída em relação ao aplicado na entrada da fibra. Esta dispersão poderá existir mesmo em uma fibra do tipo monomodo. Nas fibras multimodos o fenômeno ocorrerá em cada um dos modos transmitidos. Por este motivo, ocasionalmente é conhecida também como dispersão intramodal.

Resultados experimentais obtidos por Payne e Hartog<sup>[50]</sup> indicam que nas fibras monomodos a dispersão de material e a dispersão de guia de onda têm sinais contrários em comprimentos de onda acima de 1,2 $\mu\text{m}$ . Então, é possível que os dois efeitos se cancelem, conduzindo uma situação de dispersão nula, como se ilustra na figura anterior. Inúmeras

pesquisas foram levadas a termo procurando coincidir os comprimentos de onda de mínima dispersão e de mínima atenuação.

Inicialmente, demonstrou-se que existe um raio ótimo para o núcleo com o qual se obtém a menor dispersão de guia de onda. Valores superiores apresentam maior dispersão de material do que dispersão de guia de onda. As fibras com raio de núcleo menor do que o valor crítico apresentam um rápido crescimento na dispersão de guia de onda. Esta característica foi bastante explorada com o objetivo de controlar-se o comprimento de onda para dispersão nula.<sup>[51]</sup> O segundo fator investigado para o controle da curva de dispersão foi a dopagem da sílica com o dióxido de germânio ( $\text{GeO}_2$ ). Modificando-se esta concentração de impurezas entre 0 e 15% o ponto de dispersão nula deslocava-se entre 1,07 $\mu\text{m}$  e 1,40 $\mu\text{m}$ . Ao mesmo tempo, pesquisaram-se as influências da diferença de índices entre a casca e o núcleo. Concluiu-se que a dispersão de material decresce com o aumento da diferença entre os dois valores. O comprimento de onda para dispersão nula desloca-se para valores maiores.<sup>[52]</sup>



**Figura 9.** Fibra com dispersão aproximadamente plana em uma faixa de comprimentos de onda entre 1,25 $\mu\text{m}$  e 1,70 $\mu\text{m}$ .

A outra técnica experimentada para controlar o ponto de dispersão desprezível foi o desenvolvimento de fibras com índice em W, como descrito na Figura 5. A inclusão de um terceiro tipo de material entre o núcleo e a casca aumentou o número de parâmetros que puderam ser alterados, como a relação entre os índices de refração do núcleo e da casca com o da camada intermediária, a relação entre os raios das diversas camadas, etc.. Isto permitiu o desenvolvimento de fibra que apresentava uma dispersão quase nula ajustável em uma faixa de comprimentos de onda entre 1,2 $\mu\text{m}$  e 1,7 $\mu\text{m}$ . O aperfeiçoamento do processo permitiu a fabricação de uma fibra com resposta plana nesta faixa, como se mostra na Figura 9. Com as concentrações de impurezas muito reduzidas, a combinação com a característica de dispersão plana garante o emprego de fibras em uma faixa contínua entre 1,25 $\mu\text{m}$  e 1,7 $\mu\text{m}$ , não havendo mais a necessidade do conceito de janela para transmissão.

## XI. Conclusão

Neste artigo, descreveram-se os principais fenômenos associados à transmissão da luz em fibras ópticas,

descrevendo-se as causas e os efeitos da atenuação e da dispersão. Como o objetivo era um tratamento qualitativo, utilizaram-se, primordialmente, os conceitos da óptica geométrica. Isto permite uma descrição bastante favorável quando o diâmetro do núcleo for bem maior do que o comprimento de onda da luz guiada e quando não se exigirem a determinação da potência transmitida, das amplitudes dos campos, da distribuição de energia no núcleo e na casca e a descrição quantitativa dos efeitos não lineares na fibra óptica.

## REFERÊNCIAS

1. HAAS, W. - Technological evolution in transmission systems. *Electrical Communication*, **52** (4) : 283-288, Dec., 1977.
2. SATTÁROV, D.K. - *Fibróptica*. Trad. de Jaime Castro Blanco. Moscu, Mir, 1977.
3. KEIL, H. and PASCHER, H. - Communications enter a new era with fiber optics. *Telcom Report*, **6** (5): 4-7, Oct., 1983.
4. LACY, Edward A. - *Fiber optics*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1982.
5. HOSS, Robert J. - *Fiber optic communications design handbook*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1990.
6. YARIV, Amnon - *Quantum electronics*. 2nd. Ed., New York, John Wiley, 1975.
7. VAN HEEL, A.C.S. - A new method of transporting optical images without aberrations. *Nature*, **173**: 39, Jan., 1954.
8. HOPKINS, H.H and KAPANY, N.S - A flexible fibrescope, using static scanning. *Nature*, **173** : 39-41, Jan., 1954.
9. GIALLORENZI, T.G. - Optical communication research and technology : fiber optics. *Proc. IEEE*, **66** (7):744-780, Jul., 1978.
10. KAO, K.C. and HOCKHAM, G.A. - Dielectric-fibre surface waveguide for optical frequencies. *Proc. IEE (London)*, **113** (7):1151-1158, Jul., 1966.
11. GAMBLING, W.A. et alii - Optical fibres based on phosphosilicate glass. *Proc. IEE (London)*, **123** (6):570-576, Jun., 1976.
12. GLOGE, Detlef - Optical fibers for communications. *Appl. Optics*, **13**:249-254, 1974.
13. KATO, D. - Fused-silica core glass fibre as a low-loss optical waveguide. *Appl. Phys. Letters*, **22** :3-4, 1973.
14. PAYNE, D.N. and GAMBLING, W.A. - New silica-based low-loss optical fibre. *Electron Lett.*, **10** (15):289-290, 1974.
15. BLACK, P.W. et alii - Measurements on waveguides properties of GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> cored optical fibres. *Electron Lett.*, **10** (15):239-240, 1974.
16. KOBAYASHI, S. et alii - Low-loss optical glass fibre with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> core. *Electron Lett.*, **10** (20):410-411, 1974.
17. PAYNE, D.A. and GAMBLING, W.A. - Zero material dispersion in optical fibres. *Electron Lett.* , **11**(4): 176-178, Apr., 1975.
18. ARES, R.A. y RESTA, J.L.T. - De la fibra óptica al sistema. Parte 4 : Fabricacion de fibras ópticas. *Rev. Telegráfica Electrónica*. (7) : 651-655, Jul., 1983.
19. RESTA, J.L.T., SUÁREZ, C. y ARES R.A. - De la fibra óptica al sistema. Parte 5: Cables de fibras ópticas. *Rev. Telegráfica Electrónica* , (8):779-785, Jul., 1983.
20. JAEGER, R.E. et alii - *Fiber drawing and control*. In : MILLER, S.E. and CHYNOWETH, A.C., Eds.- *Optical fiber telecommunications*. New York, Academic Press, 1979.
21. RAMO, S., WHINNERY, J.R. and VAN DUZER, T. - *Fields and waves in communications electronics*. 3rd. Ed. New York, John Wiley, 1994.
22. MIDWINTER, J. E. - *Optical fiber for transmission*. New York, John Wiley, 1979.
23. MILLER, S. E. and CHYNOWETH, A. G. - *Optical fiber telecommunications*. Academic Press, New York, 1979.
24. OKOSHI, T. - *Optical fibers*. Orlando, Academic Press, 1982.
25. GOWAR, J. - *Optical communications systems*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1984.
26. RAMSAY, M.M., HOCKHAM, G.A. and KAO, K.C. - Propagacion em guiaondas de fibra óptica. *Comunicaciones Eléctricas*, **50** (3): 176-185, Set., 1975.
27. KEISER, G. - *Optical fiber communications*. New York, McGraw-Hill, 1983.
28. SENIOR, John - *Optical fiber communications: principles and practice*. London, Prentice-Hall, 1985.
29. ELECTRONIC INDUSTRIES ASSOCIATION. *Generic specifications for optical waveguide fibers*. Nr. EIA-4920000-A, 1978.
30. YEH, Chai - *Handbook of fiber optics*. San Diego, Academic Press, 1990.
31. LI, T. - Structure, parameters, and transmission properties of optical fibers. *Proc. IEEE*, **68** (12): 1175-1180, Dec., 1980.
32. SANDBANK, C.P. - Comunicaciones por fibra óptica. *Comunicaciones Eléctricas*, **50** (1): 21-29, Mar., 1975.
33. GIALLORENZI, T.G. - Optical communication research and technology : fiber optics. *Proc. IEEE*, **66** (7) : 744-780, Jul., 1978.
34. BLACK, P. W. - Fabrication of optical fiber waveguides. *Electrical Communications*, **51** (1): 4-11, Mar., 1976.
35. MYIA, V. et alii - Ultimate low-loss single-mode fibre at 1,55 µm. *Electron Lett.*, **15** (4): 106-108, Feb., 15, 1979.
36. SCHULTZ, P. C. - Preparation of very low loss optical waveguides. *J. Am. Ceram. Society*, **52** (4): 383-385, 1973.
37. OSANAI, H. et alii - Effect of dopants on transmission loss of low OH-content optical fibres. *Electron Lett.*, **12** (21): 549-550, 1976.
38. MAURER, R. D. - Glass fibers for optical communications. *Proc. IEEE*, **61** (4): 452-462, Apr., 1973.
39. MILLER, S. E. et alii - Research toward optical-fiber transmission systems. Part I: The transmission medium. Part II: Devices and systems considerations. *Proc. IEEE*, **61** (12): 1703-1751, Dec., 1973.
40. SUNAK, H.R.D. - *Características de propagação em fibras ópticas*. In: RIPPER FILHO, J. E. e RIBEIRO, C. A. Eds. - *Comunicações ópticas*. Campinas, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Telebrás, 1981.
41. MARCATILLI, E. A. J. and MILLER, S. E. - Improved relations describing directional control in electromagnetic wave guidance. *Bell System Tech. J.*, **48** (7): 2161-2188, Sep., 1969.
42. GENTILE, J. - Characterizing optical fibers with OTDR. *Electro-Opt. System Design*, Apr., 1981.
43. NEUMANN, E. G. - Optical time domain reflectometer comment. *Appl. Optics*, **17**:1675, 1978.
44. GARDNER, W. B. - Microbending loss in optical fibers. *Bell System Technical J.*, **54**(2): 457-465, Feb., 1975.
45. GLOGE, Detlef. - Propagation effects in optical fibers. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **23** (1): 106-120, Jan., 1975.
46. GLOGE, Detlef - Optical-fiber packaging and its influence on fiber straightness and loss. *Bell System Technical J.*, **54** (2): 245-262, 1975.
47. JEUNHOMME, L. B. - *Single-mode fiber optics: Principles and applications*. New York, Marcel Dekker, 1982.
48. GECKELER, S. - Physical principles of optical waveguides. *Telcom Report*, **6** (5): 9-14, Oct., 1983.
49. CHERIN, A. H. - *An introduction to optical fibers*. New York, McGraw-Hill, 1983.
50. PAYNE, D. N. and HARTOG, A. H. - Determination of the wavelength of zero material dispersion in optical fibers by pulse delay measurement. *Electron Lett.*, **13** :627-629, 1977.
51. MARCUSE, D. - Interdependence of waveguide and material dispersion. *Appl. Optics*, **18**: 2930-2932, 1979.
52. ADAMS, M. J. et alii - Wavelength-dispersion properties of glasses for optical fibers: The germanium enigma. *Electron Lett.* **14**: 703-705, 1978.

**José Antônio Justino Ribeiro** nasceu em Mimoso do Sul, Estado do Espírito Santo em 1946. Graduiu-se como Engenheiro Eletricista e de Telecomunicações no Instituto Nacional de Telecomunicações de Santa Rita do Sapucaí (Inatel). Obteve os graus de Mestre em Engenharia Eletrônica e Doutor em Ciência pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) de São José dos Campos - SP. Iniciou suas atividades profissionais como professor de ensino técnico de eletrônica em 1965, na Escola Técnica de Eletrônica Francisco Moreira da Costa de Santa Rita do Sapucaí. Ingressou no magistério superior no Inatel como monitor de disciplinas da área de Eletrônica, tendo sido contratado como Professor Auxiliar em 1970. Entre 1972 e 1978 foi promovido até a função de Professor Titular, com aprovação do Conselho Federal de Educação. Em 1973 ingressou na Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI) como Auxiliar de Ensino, tendo sido promovido por concurso público a Professor Assistente em 1980. Exerceu os níveis de Professor Adjunto entre 1985 e 1990 quando, novamente por concurso público, chegou a Professor Titular. Atualmente, continua em suas atividades nas mesmas instituições. Possui diversas publicações de caráter técnico e científico, como autor ou co-autor. Por mais de vinte e cinco anos tem se dedicado às disciplinas relacionadas à teoria eletromagnética, com interesse nas áreas de antenas propagação de ondas eletromagnéticas, microondas e comunicações, ópticas. É membro fundador da Sociedade Brasileira de Microondas e Optoeletrônica, membro da Sociedade Brasileira de Automática, da Sociedade Brasileira de Física, da Associação Brasileira de Ensino de Engenharia, da Sociedade Brasileira de Telecomunicações e do Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE).