

UMA INTRODUÇÃO AOS SENSORES A FIBRA ÓTICA E APLICAÇÕES MILITARES

Professor Jesse Werner Costa¹

INTRODUÇÃO

Estamos vivendo um período de acelerada evolução em ciência e tecnologia, que acarreta grandes transformações econômicas e sociais. Num intervalo de tempo muito reduzido, historicamente falando (cerca de sete décadas), partimos dos primeiros e grandes computadores a válvula dos anos 1940 e 1950 para o estágio de largo uso de computação em rede global, onde cada vez mais sentimos os efeitos da grande transformação digital que estamos vivendo, incluindo inteligência artificial, quarta revolução industrial, internet das coisas, engenharia genética, nanotecnologia, computação quântica e tantas outras revoluções tecnológicas. As grandes economias mundiais e as Forças Armadas mais poderosas do planeta apresentam elevado grau de desenvolvimento e emprego de ciência e tecnologia. Os recentes conflitos armados internacionais revelaram o poder decisivo do emprego de diversos tipos de tecnologia, com grandes vantagens para o lado detentor das tecnologias mais avançadas [1].

Este artigo descreve uma inovação tecnológica simples, mas com grande impacto em diversas áreas econômicas e de aplicação militar, o uso de fibras óticas como sensores em controle e monitoração de processos. Os sensores a fibra ótica possuem baixo custo de fabricação e demonstram ser mais vantajosos em comparação aos seus análogos convencionais, por serem compactos, leves, à prova de explosão em atmosfera inflamável (não possuem contatos

elétricos), permitem acesso à áreas normalmente inacessíveis, potencialmente fáceis de instalar, resistentes à corrosão, resistentes à radiação, resistentes à alta pressão, suportam altas temperaturas, são independentes de fonte de energia elétrica externa e intrinsecamente imunes à interferência eletromagnética, ou seja, a luz confinada no núcleo das fibras óticas não interage com qualquer campo eletromagnético circundante. Além disso, os sensores óticos podem ser imersos inúmeros meios, tais como o concreto, águas profundas, soluções corrosivas em geral, e serem mantidos em funcionamento por tempo indeterminado.

Para entender melhor como as fibras óticas podem ser usadas para sensoriamento de grandezas físicas relevantes, precisamos rever resumidamente conceitos simples e importantes como a reflexão e a refração da luz, ou seja, como a luz se comporta quando encontra outro meio de propagação. Assim podemos entender melhor como a luz pode ser confinada em um finíssimo cilindro de vidro ou plástico, a fibra ótica, possibilitando realizar comunicação de dados, proporcionando a troca segura de informações a grandes distâncias e sensoriamento de grandezas físicas.

REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

Vemos os objetos porque a luz do ambiente, que pode ser a luz do sol ou de uma lâmpada, se propaga pelo ar e quando atinge um objeto é refletida pelo mesmo em várias direções, mas somente a parte da luz refletida que chega aos nossos olhos nos permite ver uma imagem do objeto. É essa propriedade de **reflexão da luz** que nos permite ver o mundo a nossa volta. Quando um raio de luz (ou feixe de

¹ Doutor em Instrumentação e Ótica Aplicada, pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro – CEFET-RJ; Pós-doutorando em Instrumentação e Ótica Aplicada pelo Instituto Militar de Engenharia – IME.

luz) propagando em um determinado meio incide na fronteira com outro meio ocorre reflexão do feixe de luz, mas pode ocorrer também a **refração da luz**, que é a passagem de parte da energia luminosa do raio incidente para o outro meio. A luz refratada depende muito do ângulo que a luz incidente faz com a linha normal (perpendicular) à fronteira entre os dois meios. A Figura 1 ilustra os conceitos de luz refletida e refratada.

A luz possui velocidade de propagação constante no vácuo (cerca de 300.000 km por segundo), mas em outros meios, como o vidro, o plástico ou a água, a velocidade de propagação é menor (a luz é mais lenta na água ou no vidro). A razão entre a velocidade de propagação da luz no vácuo e a de um outro meio é chamada **índice de refração do meio** ($n = c/v$ onde c é a velocidade de propagação da luz no vácuo e v no meio considerado). No ar seco a luz se propaga com a mesma velocidade com que se propaga no vácuo, então o índice de refração do ar é unitário ($n_{ar} = 1$). O índice de refração do vidro comum tem valor 1,5. Logo, a velocidade da luz no vidro vale $v = c/1,5$ ou $v = 2c/3$. Significa que a luz propaga no vidro com velocidade igual a dois terços da velocidade no vácuo. O índice de refração dos materiais depende de sua estrutura química e física, como os tipos de átomos e moléculas de que são formados, as suas ligações químicas e sua estrutura cristalina, ou seja, a forma como estão espacialmente ordenados seus átomos ou moléculas. Vários fatores afetam estes arranjos, provocando mudanças no valor do índice de refração, ou seja, na velocidade com que a luz propaga. De forma mais superficial, podemos dizer que o índice de refração muda com a densidade do meio. Variações de temperatura e pressão alteram a densidade e, conseqüentemente, alteram o índice de refração.

Na Figura 1 (b) um raio de luz vindo da água incide na superfície de separação com o ar num ângulo θ_i , em relação à linha normal à superfície e reflete com mesmo ângulo, mas refrata com outro ângulo θ_r . A chave aqui é que o ângulo de refração θ_r , além de depender do ângulo de incidência θ_i , depende também da relação entre os índices de refração dos dois meios, que passamos a chamar n_i e n_r . Existe uma

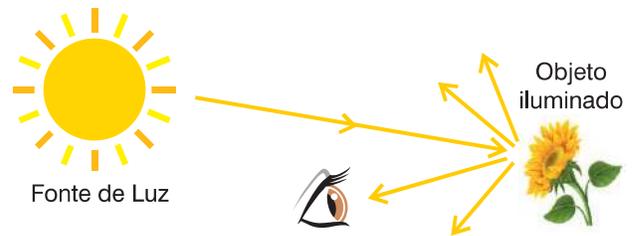


Figura 1 (a). Reflexão da luz nos objetos.

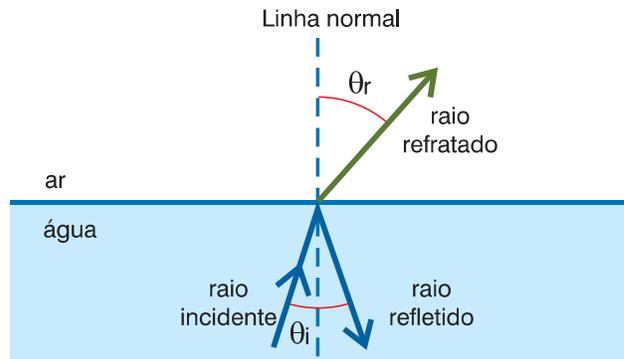


Figura 1 (b). Reflexão com refração, de um raio de luz.

relação matemática bem conhecida que mostra como o ângulo de refração θ_r varia com θ_i , n_i e n_r , que é apresentada aqui apenas por formalidade, pois não vamos fazer contas com ela. O importante é que o ângulo de refração da luz depende dos índices de refração e **entender o índice de refração de um meio é importante para entender como os sensores a fibra ótica funcionam.**

$$\text{Lei de Snell - Descartes: } \mathbf{sen\theta_r = \frac{n_i}{n_r} \cdot sen\theta_i}$$

Vamos imaginar uma situação simples, conforme mostra a Figura 2(a). Quando vemos um peixe na água é porque a luz emitida de uma fonte de luz no ambiente, sol por exemplo, atravessa a água, reflete no peixe e é reemitida na direção da superfície de separação entre a água e o ar. Ou seja, vemos o peixe porque parte da luz do ambiente refletida no peixe refrata para o ar. Mas, devido à diferença entre os índices de refração, o ângulo de refração é diferente do ângulo de incidência, o que nos faz ver o peixe no lugar errado. Podemos observar este fenômeno facilmente usando um pote com água e um lápis, como na Figura 2(b). Pela Lei de Snell-Descartes, o ângulo de refração é maior que o de incidência, pois o índice

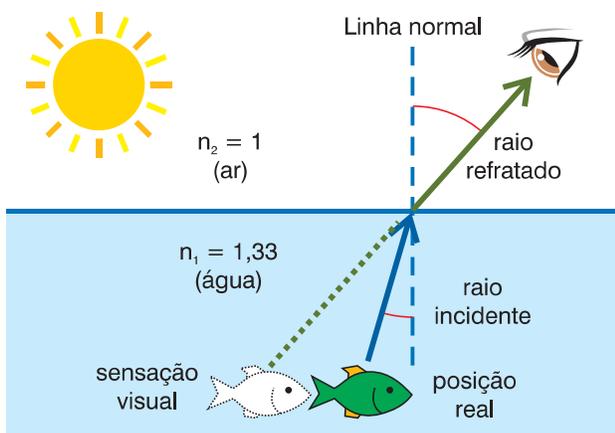


Figura 2 (a). Um raio de luz emitido por uma fonte de luz na água é refletido na superfície de separação entre os dois meios e refrata para o ar, mas devido ao ângulo de refração observamos uma imagem deslocada.



Figura 2 (b). Este efeito pode ser facilmente observado usando um lápis num pote com água.

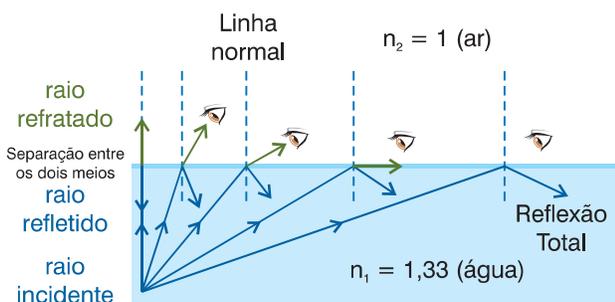


Figura 2 (c). Aumentando o ângulo de incidência da luz emitida por uma fonte laser, aumenta o de refração, até o ponto onde o ângulo de refração vale 90 graus e, a partir deste ângulo, a refração não acontece mais, ocorrendo reflexão total da luz (uma pessoa acima da água não verá o laser a partir deste ponto).

de refração da água é maior do que o do ar e isso dá a sensação visual errada como mostra a figura. Já uma fonte de luz laser emite basicamente apenas em uma direção, então se, em vez do peixe, tivermos uma fonte laser, podemos inclinar a fonte de modo a aumentar o ângulo de incidência do feixe de luz, como mostra a Figura 2(c). Se o ângulo de incidência aumentar, o ângulo de refração também aumenta (é o que diz a Lei de Snell-Descartes), até uma situação limite quando o ângulo de refração é de 90 graus. Desse ponto em diante a refração deixa de acontecer, ocorrendo reflexão total do feixe laser. Isso implica que nenhuma fração da energia transportada pela luz passa para o outro meio. Um observador acima da água (hipotético, é claro, pois não devemos olhar direto para o laser), a partir desse ponto não veria mais a luz do laser. Este ângulo de incidência que produz a refração a 90 graus é chamado de ângulo crítico ou limite.

FIBRAS ÓTICAS

Fibra ótica (ou óptica²) é um filamento flexível geralmente com espessura de alguns micrômetros³, ou seja, mais fino que um fio de cabelo, fabricado a partir de vidro ou plástico, utilizado como condutor de luz. Seu uso primário é em sistemas de comunicações (a fibra é empregada como meio de comunicação) usando luz para propagar informações. O princípio básico para a comunicação por meio de fibra ótica é utilizar no transmissor uma fonte luminosa para inserir luz em uma das extremidades da fibra e um detector de luz na outra extremidade. A modulação da luz propagada permite a transmissão das informações. A Figura 3 mostra a foto de uma fibra ótica e ilustra o conceito de sistema de comunicação empregando fibra ótica como meio de propagação da informação.

² Tradicionalmente o termo óptica se refere aos fenômenos de visão e o termo ótica aos de audição. No entanto, na língua portuguesa falada no Brasil, a palavra ótica é também uma variante de óptica. Importantes dicionários da língua portuguesa, como Aurélio e Houaiss, por exemplo, consideram ótica e óptica como palavras sinônimas.

³ Um micrômetro é um milionésimo do metro, ou seja, uma parte de um metro dividido em um milhão de partes.



Figura 3 (a). Foto de uma fibra ótica⁴.

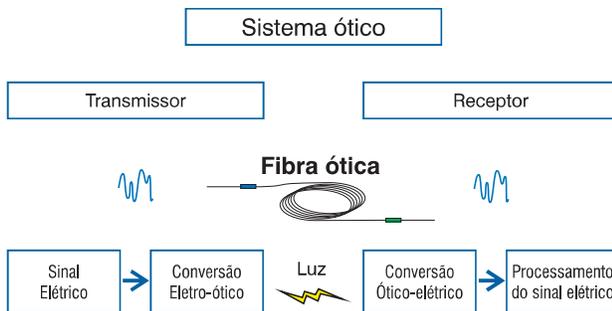


Figura 3 (b). Sistema de comunicação por fibra ótica.

A estrutura da fibra ótica é basicamente um cilindro transparente servindo como núcleo, com índice de refração representado aqui pelo símbolo n_1 , coberto por uma casca com índice de refração n_2 . A Figura 4(a) ilustra a representação dessa estrutura e apresenta valores típicos de diâmetros, indicados em μm ($1 \mu\text{m}$ é um micrômetro). No caso da fibra ótica, buscamos uma relação entre índices de refração do núcleo e da casca de modo que a maior parte da luz transferida da fonte luminosa para a fibra sofra sempre reflexão total ao longo do comprimento, de modo que a maior parte da energia transportada pela luz fique dentro do núcleo ao longo da propagação. A parte da luz transferida para a casca, quando a reflexão não é total, corresponde a uma perda de potência, pois uma parte da energia da fonte de luz recebida pela fibra no transmissor, não estará no sinal de saída no receptor. A Figura 4(b) ilustra o conceito da propagação da luz ao longo do núcleo de uma fibra ótica.

SENSORES A FIBRA ÓTICA

O estudo da propagação da luz empregando raios, como vimos até aqui, é chamado **ótica geométrica** ou

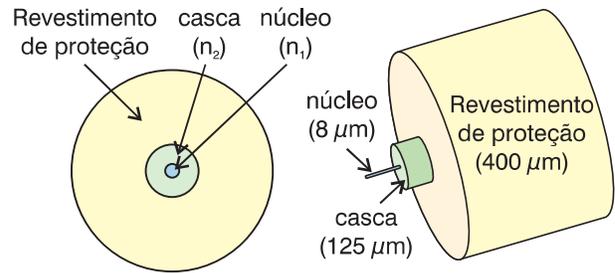


Figura 4(a). Estrutura básica de uma fibra ótica de vidro (sílica).

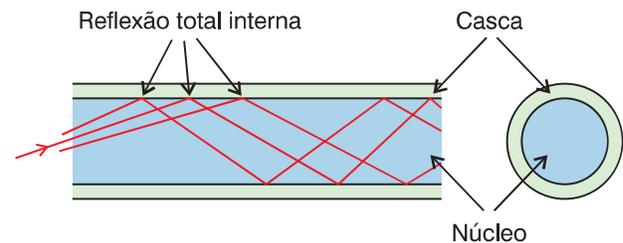


Figura 4 (b). Propagação da luz na fibra.

ótica de raio e é suficiente para explicar a reflexão da luz, a refração da luz, o comportamento de lentes e de espelhos. Outra forma de estudar a luz é através do que chamamos de **ótica física** ou **ótica ondulatória**, descrevendo a luz como **propagação de ondas** (sabemos que são ondas eletromagnéticas, ou seja, uma onda de campo elétrico propagando junto com uma onda de campo magnético). Esse é o caso quando precisamos descrever fenômenos não explicados pela ótica geométrica como a **interferência entre ondas** e a **difração da luz**, que é o desvio da trajetória retilínea da luz após ela passar pela aresta de um objeto. As ondas possuem características importantes como velocidade de propagação, amplitude, frequência, comprimento de onda e fase, que devem ser consideradas quando estudamos sensores a fibra ótica. Usamos o princípio da ótica geométrica ou da ótica física de acordo com o modelo necessário para compreender o funcionamento dos sensores. Muitas vezes escolhemos simplesmente a maneira mais fácil (geralmente a ótica geométrica) de estudar como uma grandeza física afeta um sensor. Por exemplo, quando a fibra ótica é curvada, a quantidade de energia luminosa perdida por não haver reflexão total para alguns raios, aumenta. Então a quantidade de energia recebida no final da fibra é menor. Dizemos que ocorre atenuação do sinal recebido, devido à curvatura. Assim, o

⁴ Foto por Creative Commons - "SRNL Fiber Optic Cable Installation" by Savannah River Site is licensed under CC BY 2.0.

entendimento da perda de potência no sinal recebido pode ser feito usando o princípio da ótica geométrica e pode indicar o quanto uma fibra foi curvada. Este seria um método mais simples de compreender o funcionamento de um sensor de curvatura. Outra forma seria usar a ótica física para estudar o sensor, considerando o quanto a curvatura afeta a amplitude e a fase das ondas eletromagnéticas.

Várias técnicas de sensoriamento a fibra ótica já foram propostas e desenvolvidas, sendo que vários tipos de sensores já foram comercializados e são usados amplamente em diversas aplicações práticas. Apesar das vantagens deste tipo de sensor, é preciso bom desempenho, facilidade de manutenção e baixo custo, para tornar viável sua aplicação em grande escala. Um dos obstáculos é que é necessário ter disponibilidade do sistema completo com fontes de luz, conectores, acopladores, detectores e eletrônica de detecção associada, incluindo ferramentas de software. Assim, um dos modos de tornar mais viável o uso de sensores a fibra ótica em substituição aos sensores industriais tradicionais, é empregar sensores embarcados em sistemas de comunicação por fibra ótica, que já possuem essa estrutura. A Figura 5 mostra um diagrama de blocos para um sistema básico de sensoriamento por fibra ótica. Uma fonte de luz ilumina uma das extremidades da fibra, que transmite a luz ao sensor. O princípio básico é que o elemento sensor deve modular parâmetros do sinal ótico como amplitude, frequência, comprimento de onda e fase, provocando mudanças nas características do sinal ótico, que através da fibra de recepção é guiado a um detector. Na luz transmitida, as características que forem modificadas devem ser correlacionadas com os parâmetros de interesse (temperatura, curvatura, pressão, entre outros) [2]. O detector converte o sinal de luz em sinal elétrico para ser processado de forma a podermos analisar o comportamento da variável física associada.

EXEMPLOS DE SENSOR A FIBRA ÓTICA

Para entendermos melhor os sensores a fibra ótica, vamos considerar uma característica importante da luz quando descrita como propagação de ondas: a **diferença de fase entre ondas**. Cada raio de luz pode

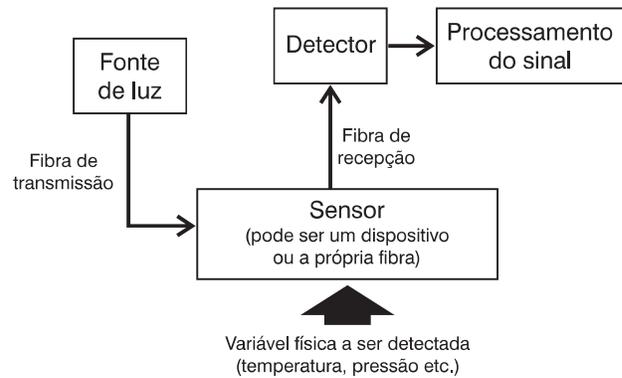


Figura 5. Sistema básico de sensoriamento por fibra ótica.

ser considerado como uma frente de onda, ou seja, uma onda se propagando no sentido do raio. Usando o modelo da ótica geométrica, quando raios de luz propagam ao longo da fibra usando caminhos de comprimentos diferentes, como na Figura 4 (b), ao se cruzarem, o fazem com diferença de fase, que chamamos de ângulo de fase. A Figura 6(a) ilustra esse conceito. No encontro das duas ondas ocorre um fenômeno importante chamado **interferência**. Quando duas ondas se interferem, dependendo do ângulo de fase, essa interferência pode ser construtiva, quando os sinais se somam produzindo um sinal maior, ou destrutiva, quando os sinais se subtraem produzindo um sinal menor ou mesmo se anulando completamente. Depois do ponto de cruzamento as ondas continuam a se propagar como se nada tivesse acontecido, como ilustram as Figuras 6 (b), (c) e (d). Podemos usar a interferência entre ondas para produzir sensores acústicos, onde a pressão exercida pelas ondas em fibras óticas pode provocar diferença de fase.

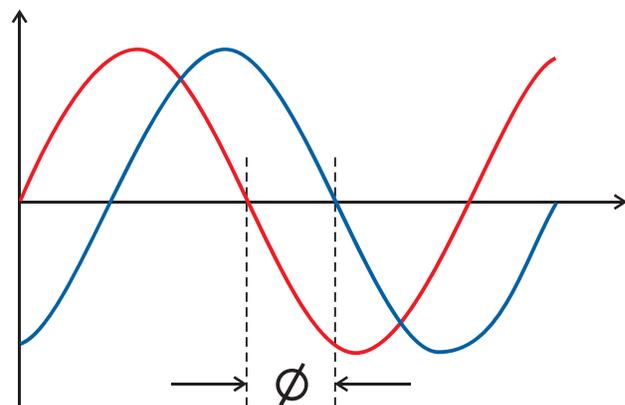


Figura 6 (a). Duas ondas cruzam com diferença de fase (os pontos de máximo e mínimo não coincidem).

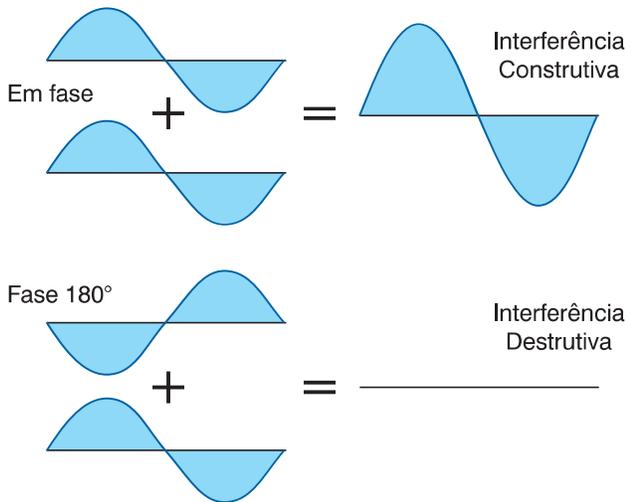
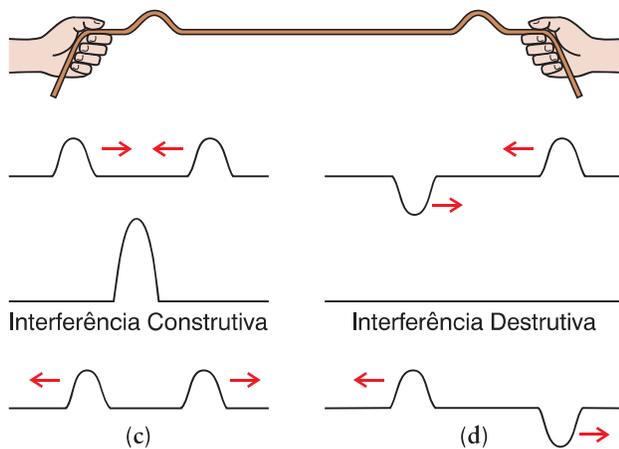


Figura 6 (b). Ondas que se cruzam se interferem, ou seja, suas intensidades (amplitudes) se somam. Dependendo do ângulo de fase, a interferência pode ser construtiva (soma das amplitudes) ou destrutiva (subtração das amplitudes).



Figuras 6 (c) e 6 (d). Exemplos de interferências construtivas e destrutivas entre pulsos (o pulso é energia que transmitimos quando agitamos uma corda, por exemplo, uma pessoa de cada lado). Os pulsos de energia se deslocam e se encontram. No encontro ocorre o fenômeno de interferência. Em seguida continuam se deslocando como se nada tivesse acontecido.

Um conceito básico de sensor acústico usando fibra ótica operando por interferência, está ilustrado na Figura 7(a). A luz emitida pela fonte é dividida em dois caminhos por um acoplador ótico. Num dos caminhos uma fibra ótica enrolada em um carretel opera como sensor primário das ondas acústicas (fibra sensor). No outro temos o mesmo tipo de fibra ótica também enrolada em um carretel, que geralmente está acusticamente isolada, ou seja, não

está exposta às ondas de pressão (fibra de referência). Se não ocorrem ondas acústicas, a luz propaga igualmente pelos dois caminhos e o detector recebe dois sinais óticos em fase. Quando ocorrem ondas acústicas, a variação de pressão contrai e expande o carretel, causando deformações no comprimento da fibra que opera como sensor. As deformações produzem alterações no índice de refração da fibra, fenômeno conhecido como efeito fotoelástico (alterações na estrutura interna da fibra produzem alterações na forma com que as ondas luminosas propagam). Como vimos anteriormente, o índice de refração está relacionado com a velocidade da luz no meio. Mas este efeito ocorre somente no lado sensor. Como a fibra de referência não sofre nenhuma alteração, no reacoplamento os dois sinais óticos apresentam diferença de fase e a interferência entre as ondas produz sinais diferentes no detector. As variações no índice de refração são muito pequenas, mas o resultado no detector é visível, pois este sensor possui sensibilidade muito alta. Este método de sensoriamento é conhecido como interferômetro Mach-Zehnder e o dispositivo sensor é conhecido como **hidrofone interferométrico a fibra ótica**, possuindo ampla utilização como sonar e detector sísmico [3,4]. Na Figura 7(b) temos outro exemplo de sensor a fibra ótica por interferência. Dessa vez, em vez da luz ser transmitida diretamente da fonte até o detector, uma outra técnica é utilizada. A luz emitida pela fonte é transferida para o sensor através de uma fibra e é refletida por uma película de ouro depositada na ponta do sensor [5]. A luz refletida propaga de volta pela fibra e é separada da luz emitida pela fonte por um dispositivo de acoplamento chamado **circulador**. A luz refletida separada pelo circulador propaga até o detector (neste caso um analisador de espectro ótico ou Optical Spectrum Analyzer - OSA), onde o sinal luminoso é analisado. Este tipo de sensor foi empregado num experimento para medir a vazão de um fluido que, ao passar pelo sensor força o mesmo a se curvar, o que promove diferença de fase entre as ondas componentes da luz, como foi descrito anteriormente. A Figura 7 (c) mostra o esquema do experimento, com o sensor dentro de um tubo onde o fluido é ar em movimento.

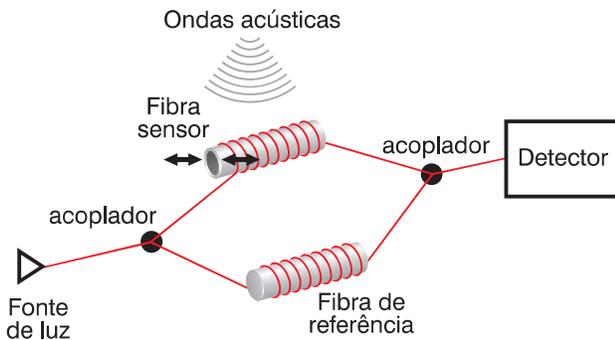


Figura 7 (a). Estrutura de um sensor acústico por deslocamento de fase (hidrofone).

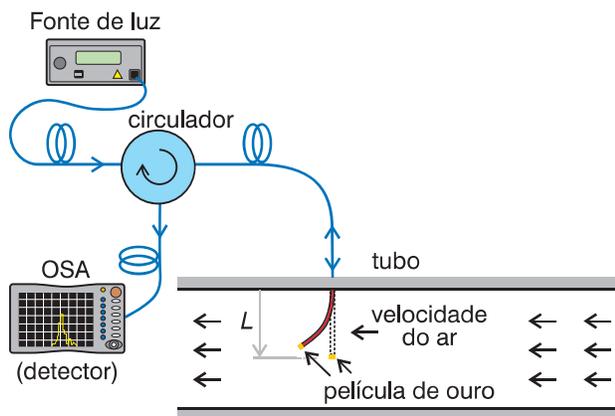
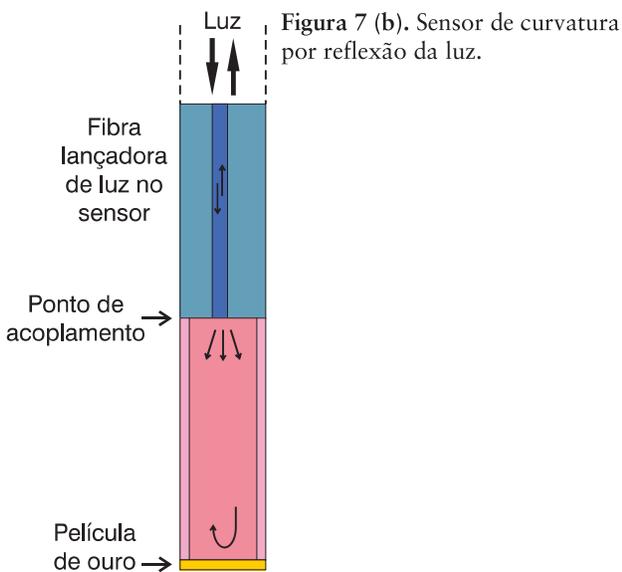


Figura 7 (c). Esquema do teste do sensor de vazão em túnel de vento. A curvatura do sensor devido ao fluxo de ar produz diferenças de fase nas ondas luminosas, cujos efeitos são investigados por um analisador de espectro ótico (OSA).

O experimento do sensor a fibra ótica por reflexão como sensor de vazão foi realizado na Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, em Campinas-SP, empregando o túnel de vento de um dos laboratórios da faculdade de engenharia mecânica. O sensor foi confeccionado em bancada ótica do Instituto Militar de Engenharia - IME, no Rio de Janeiro-RJ, e o teste revelou excelente comportamento do disposto como sensor de vazão e anemômetro [5]. A Figura 8 (a) mostra a montagem do experimento. No primeiro plano encontram-se a fonte de luz, o detector (analisador de espectro ótico) e o equipamento de medida da velocidade do ar por diferença de pressão. Em segundo plano o túnel de vento com um tubo de acrílico na câmara de teste, onde está instalado o sensor. Na Figura 8 (b) a foto mostra o detalhe da montagem do tubo na câmara de teste.

APLICAÇÕES DE SENSORES A FIBRA ÓTICA

Em aplicações nas áreas de petróleo e gás, produtos químicos em geral e transporte de material inflamável, os sensores a fibra apresentam a vantagem de serem

Figuras 8. Sensoriamento de vazão por reflexão da luz.



Figura 8 (a). Foto do experimento em túnel de vento na UNICAMP.



Figura 8 (b). Detalhe do sensor montado num tubo de acrílico dentro da câmara de teste (a elipse amarela mostra a posição do sensor dentro do tubo).

incorporados às diretrizes de segurança intrínseca a baixo custo, quando comparados aos sensores convencionais elétricos empregados hoje. Essa característica é vital para a segurança de processos industriais envolvendo produção, transporte e armazenagem dos mencionados produtos [6]. Por serem resistentes a temperaturas extremas, alta pressão e corrosão, os sensores a fibra ótica são muito empregados em medida de temperatura e pressão em poços de petróleo, onde sensores comuns não poderiam ser utilizados. A Figura 9 (a) mostra uma aplicação de sensores a fibra ótica em SAGD – *Steam Assisted Gravity Drainage* (drenagem por gravidade assistida a vapor). Os cabos indicados na figura são formados por fibra ótica com sensores distribuídos, ou seja, ao longo da fibra exist-

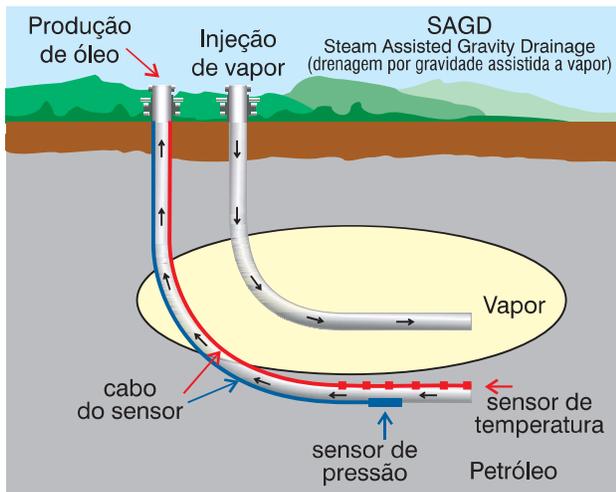


Figura 9 (a). Uso de sensores a fibra ótica em produção de petróleo.

Figura 9 (b). Sensoriamento de corrente elétrica em uma subestação [7].



tem estruturas muito pequenas e espaçadas que operam como sensores, para indicar temperatura e pressão ao longo dos cabos [2,4]. Na área de geração e transmissão de energia elétrica, como outro exemplo, existem máquinas, subestações e linhas de transmissão operando com potências muito elevadas (frequentemente quilowatts ou megawatts), exigindo o emprego de alta tensão (dezenas ou centenas de quilovolts) e correntes elétricas da ordem de milhares de ampères. Nestes casos, a imunidade à interferência eletromagnética é fundamental para realizar comunicações e sensoriamento com segurança e confiabilidade [7]. A Figura 9 (b) mostra um exemplo de sensoriamento de corrente elétrica empregando sensor a fibra ótica em uma subestação.

Figuras 10. Crescimento do mercado de sensores a fibra ótica

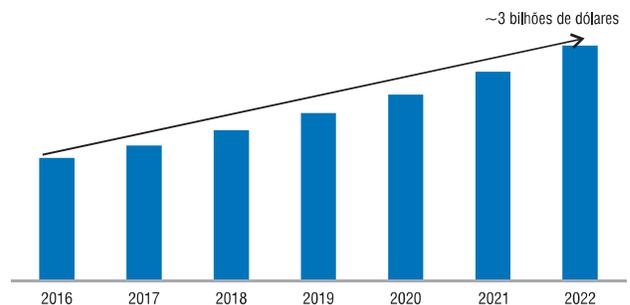


Figura 10 (a). Receitas globais com previsão até 2022 [8].

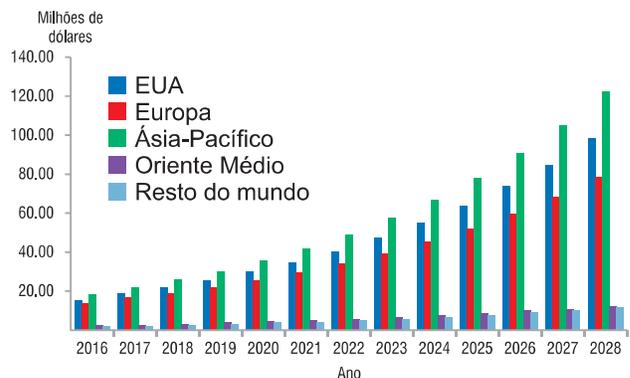


Figura 10 (b). Previsão do comportamento do mercado de sensores distribuídos a fibra ótica na indústria, por região global, no período 2016-2028 [9].

Veículos de mídia especializados em análise de mercado mostram o crescente aumento dos investimentos em sensores a fibra ótica, além de realizarem projeções para o futuro. A Figura 10 apresenta em (a) a previsão do crescimento dos investimentos globais na área de sensores a fibra ótica [8] e em (b) projeções para negócios no mercado de sensores distribuídos a fibra ótica na indústria, por região do mundo, até 2028 [9].

APLICAÇÕES MILITARES DE SENSORES A FIBRA ÓTICA

Na área militar também é crescente a aplicação de sensores a fibra ótica. Como exemplo, os submarinos nucleares norte-americanos Classe Virgínia empregam como sonar, sensores a fibra ótica em conjuntos de hidrofones colocados na lateral do casco. Os hidrofones foram desenvolvidos pela empresa Northrop Grumman Corp [10]. e, em vez dos tradicionais transdutores cerâmicos, operam por pressão diferencial em sensores a fibra ótica [11, 12], como descrito na Figura 7 (a). A Figura 11 mostra imagens do conjunto de hidrofones e do submarino. A mesma empresa, desenvolveu um sistema de vigilância antiespionagem e antiterrorismo, empregando sensores acústicos a fibra ótica, a serem posicionados na entrada de portos com objetivo de estabelecer um perímetro de monitoração do porto, acoplado a um sistema de controle de vigilância em terra, com capacidade de detecção de possíveis atividades de invasão, como entrada de mergulhadores e veículos submarinos estranhos [11, 13]. Testes reais foram realizados para comprovar a detecção de ameaças potenciais, em Port Hueneme, na Califórnia, EUA. Nos testes, pequenas embarcações entrando na área monitorada foram detectadas e rastreadas, bem como mergulhadores empregando dispositivos de propulsão operados por bateria. A Figura 12 mostra o local de testes.

Na área aeroespacial existem várias aplicações de sensores a fibra ótica, como sensores de temperatura, sensores de tensão mecânica e também giroscópios óticos. Como exemplo, sensores de rotação foram instalados em unidades da família de foguetes norte-americanos Delta Rocket [14]. Sensores elétricos e óticos para medida de temperatura

Figuras 11. Submarino nuclear norte-americano Classe Virgínia.



Figura 11 (a). Detalhe de um conjunto de hidrofones (repare uma pessoa colocada acima e à direita, para indicar noção de tamanho) [11].



Figura 11 (b). Localização dos 6 hidrofones (3 de cada lado do casco) [11].



Figura 12. Sistema de vigilância antiespionagem e antiterrorismo, empregando sensores (submersos) acústicos a fibra ótica em Port Hueneme, Califórnia – EUA [11].

e tensão foram incorporados à superfície do tanque de hidrogênio de unidades do projeto Delta Clipper, da força aérea norte-americana. Os sensores elétricos não sobreviveram aos testes, mas todos os sensores a fibra ótica funcionaram e passaram a ser empregados nos testes posteriores [14]. Sensores óticos distribuídos são empregados para monitorar

corrosão e deformação de asas e juntas em aviões. A integridade estrutural dos tanques de combustível dos ônibus espaciais também foi monitorada por sensores a fibra ótica instalados na superfície dos tanques para mapear as tensões. Os sensores óticos são ainda utilizados em veículos lançadores de naves espaciais, em missões para a lua, em todos os veículos lançados para Marte e também são usados em satélites para posicionamento e rastreamento [14].

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Além de serem largamente empregadas em sistemas de comunicação como sendo o meio de comunicação, as fibras óticas também são empregadas em controle e monitoração de processos como sensores das mais diversas grandezas físicas como pressão, vibração, curvatura, temperatura, umidade, pH, campos elétricos e magnéticos e muito mais. Propriedades importantes da luz como reflexão, refração e interferência são fundamentais para o funcionamento dos sensores óticos. O modo como as grandezas físicas mencionadas afetam essas propriedades e os índices de refração dos meios em que a luz se propaga, define o comportamento e desempenho dos sensores. Existe um número muito grande de tipos de sensores a fibra ótica e este artigo abordou, de forma introdutória, apenas dois tipos básicos: interferência entre ondas devido à pressão acústica em fibra, com aplicação como hidrofone, e interferência entre ondas devido à curvatura da fibra provocada pelo fluxo de ar em movimento, no exemplo do sensor testado no túnel de vento. Neste último caso, a curvatura da fibra resulta numa variação de potência luminosa medida, permitindo empregar este dispositivo como sensor de vazão e anemômetro. A abordagem neste artigo é feita de modo superficial, devido à complexidade do assunto, uma vez que o objetivo aqui é apenas apresentar uma introdução a este importante e instigante tema. Vantagens importantes dos sensores a fibra foram abordadas ao longo do texto e foi apresentado um quadro resumido dos investimentos globais realizados na área, com projeções para os próximos anos, divulgadas em periódicos internacionais especializados em comportamento dos mercados mundiais. No

plano global o Brasil é um investidor ainda muito tímido, mas é importante para nosso desenvolvimento investir mais em ciência e tecnologia, uma vez que este tema é de reconhecida importância estratégica. Exemplos de aplicações em áreas civis e militares foram apresentados, bem como suas vantagens em relação aos métodos convencionais. Além das aplicações em segurança mencionadas, existem muitas outras, inclusive com empresas especializadas em detecção de intrusão por sensores a fibra ótica. A bibliografia indicada, além de compreender as referências empregada no texto, permite aprofundamento do estudo em diversos tópicos deste amplo e relevante assunto.

REFERÊNCIAS

- [1] LODI, CLÁUDIA Q. e COSTA, JESSE W. Os desafios da formação de Oficiais de Marinha diante das constantes inovações tecnológicas. *Revista de Villegagnon*, v. IX, n. 9, p. 84-88, 2014.
- [2] KROHN, D; MacDOUGALL, T.; MENDEZ, A. *Fiber Optic Sensors – Fundamentals and Applications*. USA: SPIE PRESS; 2014. p. 21-24 e 287-284.
- [3] KIRKENDALL, CLAY K. e DANDRIDGE, ANTHONY. Overview of high performance fibre-optic sensing. *J. Phys. D: Appl. Phys.* v. 37, p. 197-216, 2004.
- [4] BALDWIN, CHRISTOPHER S., Brief history of fiber optic sensing in the oil field industry, SPIE SENSING TECHNOLOGY + APPLICATIONS, In: Proc. SPIE v. 9098, *Fiber Optic Sensors and Applications XI*, p. 909803, 2014.
- [5] COSTA, JESSE W., FRANCO, MARCOS A., SERRÃO, VALDIR A., CORDEIRO, CRISTIANO M. E GIRALDI, MARIA T. R., Macrobending SMS fiber-optic anemometer and flow sensor. *Optical Fiber Technology*, v. 52, p. 101981, 2019.
- [6] KERSEY, A. D. Optical fiber sensor for permanent downwell monitoring applications in the oil and gas industry. *IEEE Transaction Electronics: Special Issue on Optical Fiber Sensors*, v. E83-C, n.3, p. 400-404, 2000.
- [7] Bohnert, K., Gabus, P., Kostovic, J. e Brandle, H. Optical fiber sensors for the electric power industry. *Optics and Lasers in Engineering*. v. 43, p. 511-526, 2005.

[8] MARKET RESEARCH FUTURE. **Fiber Optic Sensor Market Research Report- Forecast to 2022**. Disponível em: <<https://www.marketresearchfuture.com/reports/fiber-optic-sensor-market-2514>>. Acesso em 12 set. 2019.

[9] VISIONGAIN. **Distributed Fibre Optic Sensing (DFOS) Market Report 2018-2028**. Disponível em: <<https://www.visiongain.com/report/distributed-fibre-optic-sensing-dfos-market-report-2018-2028/>>. Acesso em 12 set. 2019.

[10] USS MISSOURI VIRGINIA CLASS SUBMARINE COMMISSIONING COMMITTEE. **About the Virginia Class Submarines**. Disponível em: <http://www.usmissouri-submarine.org/virginia_class.html>. Acesso em 02 out. 2021.

[11] NORTHROP GRUMMAN. **Navigation Systems - Fiber-Optic Acoustic Sensors (FOAS)**. Disponível em <<https://www.yumpu.com/en/document/view/8806595/fiber-optic-acoustic-sensors-foas-northrop-grumman->>. Acesso em 02 out. 2021.

[12] MENG, ZHOU. CHEN, WEI. WANG, JIANFEI. HU, XIAOYANG. CHEN, MO. e ZHANG, YICHI. Recent Progress in Fiber-Optic Hydrophones. **Photonic Sensors**, v. 11, n. 1, p. 109–122, 2021.

[13] BICK, E.T. e BAROCK, R.T. CENTURION Harbor Surveillance Test Bed. IEEE OCEANS 2005 MTS/IEEE - Washington, DC, USA (18-23 Sept. 2005). **Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE**, 2005.

[14] (71) UDD, E.; SCHEEL, I. U. Mars or bust! 40 years of fiber optic sensor development, In: Commercial + Scientific Sensing and Imaging, 2017, Anaheim-CA-USA. Anais, **Fiber Optic Sensors and Applications XIV**, SPIE v. 10208, n. 2, p. 1-10, 2017.