

# Sistemas de comunicação ótica: do surgimento à maturidade

Luiz Henrique Bonani<sup>1</sup>, Eric Alberto de Mello Fagotto<sup>2</sup>, Marcelo Luís Francisco Abbade<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do ABC (UFABC)

<sup>2</sup>Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas)

<sup>3</sup>Universidade Estadual Paulista (UNESP)

## Resumo

Os sistemas de comunicação ótica tornaram-se a principal infraestrutura para o transporte de grandes volumes de dados e são, assim, essenciais para a Sociedade da Informação na qual vivemos. Neste artigo, apresenta-se um breve histórico desses sistemas, abrangendo desde o seu surgimento até o seu desenvolvimento e a sua consolidação.

## Sistemas de comunicação ótica: o surgimento

Em 1966, Charles Kao demonstrou que uma fibra de vidro ultrapuro, constituída por uma estrutura núcleo-casca, com índice de refração do núcleo ligeiramente maior que o da casca, apresentaria perda (atenuação) menor que 20 dB/km. Tal descoberta evidenciou que este meio ótico poderia ser comercialmente viável para sistemas de comunicação [1]. Para se ter uma ideia dessa ordem de atenuação, após um sinal percorrer 1 km em uma fibra ótica, restaria apenas 1% da potência inicial. Nessa época, as pesquisas com lasers e fotodiodos, dispositivos baseados em semicondutores, no efeito fotoelétrico [2] e nas aplicações da teoria quântica da radiação [3], já estavam em pleno desenvolvimento. Porém, foi apenas no ano de 1970 que as fibras óticas com atenuação menor do que 20 dB/km foram fabricadas [4]. Atualmente, com as fibras de atenuação de 0,2 dB/km, utilizadas nos sistemas de comunicação ótica, pode-se percorrer uma distância de 100 km até que a potência do sinal diminua para 1% da potência inicial. Fontes de luz usando Diodo Emissor de Luz (*Light Emitting Diode* - LED) foram usadas

nos primeiros sistemas de comunicação ótica. No entanto, a luz gerada por essas fontes é espectralmente larga, incoerente, não polarizada, multidirecional e de baixa potência para atingir as distâncias necessárias. Esses problemas foram resolvidos, também em 1970, com o advento de lasers operando estavelmente em temperatura ambiente [5]. Essa invenção impulsionou significativamente a aplicação prática desses sistemas.

As primeiras fibras óticas possuíam um diâmetro do núcleo da ordem de 60  $\mu\text{m}$ , com índice de refração constante. Essa estrutura de fibra deu origem à denominação Fibras Óticas Multimodo (*Multi-Mode optical Fibers* - MMF), uma vez que a energia de um sinal ótico se dividia durante o percurso em vários modos de propagação, que nada mais são do que configurações do campo eletromagnético que podem ser guiadas pela fibra. Essa propagação em múltiplos modos representou um dos grandes problemas enfrentados pela primeira geração de sistemas óticos de comunicação, pois cada modo viaja com uma velocidade própria. Esse efeito aumenta a duração de pulsos digitais, restringindo a taxa de bits.

Mudanças no perfil do índice de refração do núcleo ainda foram propostas para essas fibras, mas isso não eliminou o problema, que ficou conhecido como Dispersão Cromática Modal, ou simplesmente Dispersão Intermodal. Isso limitava a distância que um sinal poderia se propagar por fibras antes que fosse necessária uma regeneração eletrônica completa, ou seja, antes que o sinal ótico precisasse ser convertido para o domínio eletrônico para reamplificação, reformatação e retemporização. Esse tipo de dispositivo re-

gerador é conhecido como regenerador 3R ou repetidor. De fato, os primeiros óticos de comunicação ótica (800 a 900nm), na qual essas fibras alcançavam coeficientes de atenuação da ordem de 4 dB/km (equivalente a restar 1% da potência inserida após 5 km). Mesmo usando lasers semicondutores, havia a necessidade de muitos regeneradores ao longo de um caminho ótico (da ordem de um a cada 10 km) para uma taxa de poucas dezenas de Mbits/s.

Ainda durante a década de 1970, percebeu-se que a migração dos sistemas da primeira janela de comunicação para a Banda O (Original, de 1260 a 1360 nm), traria grande vantagem econômica devido ao menor número de regeneradores necessários. Isso acontece porque o coeficiente de atenuação das fibras óticas nesta segunda janela é da ordem de 0,5 dB/km (haveria 1% da potência inicial após 40 km). Após intensas pesquisas com o desenvolvimento de lasers e fotodiodos para operarem nessa janela, os primeiros sistemas óticos de segunda geração apareceram no início da década de 1980. Contudo, devido à dispersão intermodal, a taxa alcançada ainda era menor do que 100 Mbits/s. O aprimoramento dos processos de fabricação, diminuiu o diâmetro do núcleo da fibra para cerca de 10  $\mu$ m, eliminando a propagação em múltiplos modos e confinando toda a energia em um único modo fundamental de propagação.

Desta forma, surgiram as fibras óticas monomodo (*Single-Mode optical Fibers* – SMF) [6]. A adoção das SMFs eliminou a dispersão intermodal, mas outro fenômeno chamado de Dispersão Cromática ou Dispersão da Velocidade de Grupo (*Group-velocity dispersion* – GVD) [7], alargava o pulso no domínio do tempo durante a propagação do sinal. Porém, algo que foi preponderante para a migração dos sistemas para a segunda janela de comunicação é que

o coeficiente de dispersão GVD, que rege o comportamento desse fenômeno, é nulo em 1310 nm. Com isso, houve um melhor gerenciamento dos efeitos de dispersão, sendo possível demonstrar taxas de até 2 Gbits/s com regeneradores regeneradores espaçados em até 44 km [8] em 1981 e, no final dessa década, tais sistemas eram comerciais.

Nessa época, já se sabia que a janela de comunicações em torno de 1550 nm, chamada de banda C (Convencional, de 1530 a 1565 nm), apresentava o menor nível de atenuação possível, de aproximadamente 0,2 dB/km. Entretanto, a migração para a banda C foi postergada porque a GVD é alta nessa janela (quando comparada àquela da banda O) e por causa da relativamente grande largura de linha dos lasers até então usados, que oscilavam em múltiplos modos longitudinais, sendo chamados de MLM (*Multiple Longitudinal Modes*) [9].

É importante destacar que, durante a década de 1970, na América do Norte e na Europa, toda a infraestrutura de telefonia fixa, então baseada em um sistema analógico de comutadores eletromecânicos e manuais, estava em processo de digitalização. Na época, houve a adoção de um canal de voz padronizado, que ocupava uma banda limitada a 4 kHz, com taxa de amostragem de 8 kHz, quantização de 8 bits e multiplexação por divisão temporal (*Time Division Multiplexing* – TDM). A telefonia móvel, por sua vez, estava longe de se tornar realidade, o que só ocorreu em meados da década de 1980, com a primeira geração de telefonia celular, que oferecia apenas serviços de voz em modo analógico. Ainda durante a década de 1980, a Internet começou a se espalhar, ainda de maneira tímida, com a padronização e adoção dos protocolos TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) e comutação de datagramas. O contexto de novas tecnologias para telecomunicações demandava uma infraestrutura com banda larga, que pudesse escoar altas ta-

xas de bits a longas distâncias e a infraestrutura de fibras óticas era uma candidata óbvia. Porém, faltava uma maneira de implementar a multiplexação no domínio ótico e superar as limitações impostas pela GVD na janela de 1550 nm. Uma alternativa muito estudada, desde o final da década de 1970, foi a adoção de fibras óticas de dispersão deslocada (*Dispersion Shifted optical Fiber - DSF*), que, com mudanças no perfil do guia de onda, trouxe o comprimento de onda de dispersão nula para dentro da terceira janela de comunicação ótica (banda C), diminuindo o impacto da GVD [10]. Essa solução, apesar de bastante interessante, potencializou problemas com efeitos não lineares, que já prejudicavam sistemas operando com altas taxas e longas distâncias. A influência da GVD foi mitigada com o desenvolvimento de lasers com supressão de modos longitudinais de oscilação, devido à diminuição drástica da largura de linha do laser. Tais dispositivos ficaram conhecidos como lasers de modos longitudinais únicos (*Single-Longitudinal Modes - SLM*) e, dentre estes, os lasers com retroalimentação distribuída (*Distributed FeedBack - DFB*) são os mais conhecidos [9]. Outro importante fator, que impulsionou a migração para a terceira janela, foi o desenvolvimento, no final da década de 1980, dos amplificadores óticos construídos com fibras dopadas com terras raras. Esses amplificadores permitem a reamplificação de qualquer sinal (ou conjunto de sinais) no domínio ótico, dentro da banda C, sem a necessidade de conversão para o domínio eletrônico. Tais amplificadores nada mais são do que regeneradores 1 R (fazem apenas a reamplificação do sinal) e o amplificador com fibra dopada com Érbio (*Erbium-Doped Fiber Amplifier - EDFA*) foi o de maior relevância comercial. Concomitantemente, sistemas com detecção coerente, usando

não apenas a modulação da intensidade do sinal, mas também da fase, estavam sendo estudados desde meados da década de 1980. Isso, posteriormente, também contribuiu para a melhoria dos sistemas óticos de comunicação em termos de taxas de bits e distância percorrida.

O início da comercialização massiva de amplificadores óticos no começo da década de 1990 foi acompanhado por dois outros fatores essenciais para o desenvolvimento da Internet e de seu *backbone* ótico. Do ponto de vista de aplicativos, surgiu o HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*), protocolo que permitiu a criação de uma interface gráfica amigável com usuários que não eram especialistas em informática. Do ponto de vista geopolítico, houve o fim da Guerra Fria, o que fomentou um rápido movimento de globalização da Economia. Este cenário tornou-se propício para a geração de uma rede internacional de computadores que facilitasse a troca de informações e, sobretudo, a realização de transações comerciais e financeiras à distância, ampliando as fronteiras dos mercados consumidores.

Também no início da década de 1990, aconteceu uma outra grande revolução da comunicação ótica, com a adoção da multiplexação por divisão de comprimentos de onda (*Wavelength Division Multiplexing - WDM*). Nesta estratégia, transmissores óticos, cada um operando com o laser em dado comprimento de onda (canal de transmissão), enviava, na época, sinais modulados a taxas de dezenas de Gb/s ao longo de distâncias de centenas de quilômetros (espaçadas por enlaces de dezenas de quilômetros entre amplificadores óticos). Isso correspondia a taxas agregadas de dezenas de Tbits/s e pode-se dizer que o advento de sistemas WDM foi o marco da consolidação dos sistemas óticos de comunicação, como a principal infraestrutura para o transporte de grandes volumes de dados. O tratamento da GVD para tais sistemas também evoluiu com o

emprego de uma técnica de alternância de SMFs convencionais com fibras óticas de compensação de dispersão (*Dispersion Compensation optical Fiber - DCF*), que possui coeficiente de dispersão negativo dentro da terceira janela, e permite a obtenção de um baixo nível de GVD no receptor.

A última grande inovação dos sistemas de comunicação ótica ocorreu ao final da década de 2000, quando a utilização de processadores digitais de sinais (*Digital Signal Processing - DSP*) tornou-se comercial. Esses processadores viabilizaram a implementação dos sistemas com detecção coerente que, entre outros fatores, permitem o uso de sinais multi-níveis com taxas de transmissão que, hoje, ultrapassam 400 Gbits/s em cada canal WDM. Os DSPs também podem ser usados para compensar a GVD em enlaces com milhares de quilômetros de comprimento. Essa estratégia, elimina o uso de DCFs em nós intermediários, reduzindo custos e tornando muito mais simples o gerenciamento da dispersão. Os DSPs também mitigam a dispersão de modo de polarização (*Polarization Mode Dispersion, PMD*), um efeito que alarga pulsos digitais e degrada significativamente sistemas que operem com taxas superiores a 10 Gbits/s. Diferentemente da GVD, a influência da

PMD varia com o tempo e, portanto, sua mitigação requer algoritmos dinâmicos. A partir daqui, faremos uma análise histórica das principais tecnologias para comunicação ótica que surgiram ao longo dos anos, tendo como referência o número de publicações na base de dados *Web of Science*. Nessa busca, os termos *Lasers*, *Fibras Óticas* e *Fotodiodos* não foram incluídos, pois entendemos que estão em constante desenvolvimento e continuam a atrair a atenção de pesquisadores. As buscas por todos os outros termos ficaram restritas à área de redes e comunicação ótica. Essas restrições foram definidas a partir da obrigatoriedade de aparecerem os termos *optical network*\*<sup>1</sup> ou *optical communication*\* nos metadados (título, resumo e palavras-chave) de cada trabalho encontrado.

### Sistemas de comunicação ótica: a maturidade

A Figura 1 mostra os resultados da busca de publicações que correspondem ao termo “*Wavelength Division Multiplexing*” ao longo dos anos, com as restrições já discutidas. As barras representam os números reais de publicações por ano e a linha vermelha mostra a média aritmética móvel de uma janela temporal de 5 anos, englobando o ano de análise e os quatro anos imediatamente anteriores. Tal artifício foi adotado para atenuar as oscilações que podem ocorrer entre os dados de anos sucessivos.

A Figura 2 mostra a média móvel de 5 anos do número de publicações ao longo dos anos, considerando tecnologias que foram fundamentais para os sistemas de comunicação ótica atingirem a fase de maturidade.

A Figura 2(a) mostra tecnologias ligadas à in-

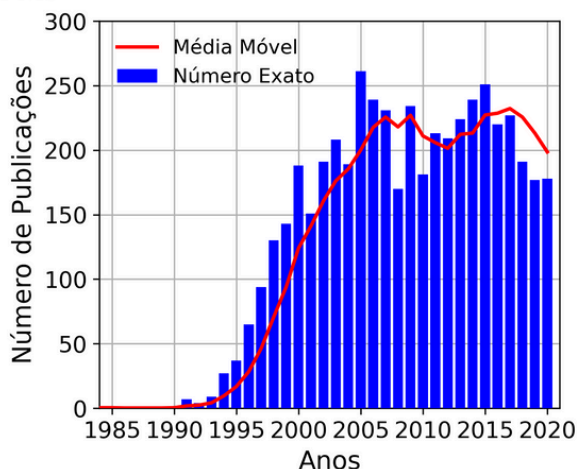


Figura 1. Número de publicações com a temática WDM e a média móvel de 5 anos.

<sup>1</sup>O asterisco (\*) é um artifício de busca na base de dados *Web of Science* para permitir outros termos que tenham o mesmo radical. Por exemplo, *network*\* pode permitir termos como *network*, *networks*, *networking*, etc.

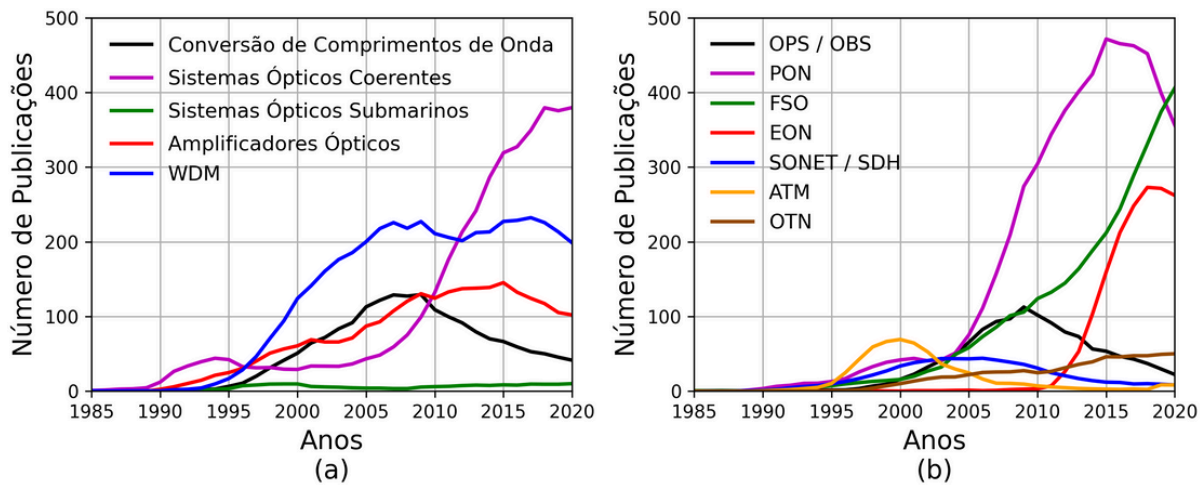


Figura 2. Média móvel de 5 anos referente ao número de publicações com abordagem de várias temáticas (a) na infraestrutura das redes óticas e (b) na operação das redes óticas.

fraestrutura. A saber: a própria tecnologia WDM; amplificadores óticos (*optical amplif\**); sistemas submarinos (*submarine*); sistemas coerentes (*coherent*); e conversão de comprimentos de onda (*wavelength conver\**). Conforme pode ser constatado, a partir da segunda metade da década de 1990, há um grande volume de publicações com o tema WDM, demonstrando o grande interesse no tema, com estabilização, em torno de aproximadamente 215 trabalhos por ano, a partir do ano de 2005. Já a tecnologia de amplificadores óticos começa a ter grande apelo no início da década de 1990 e o número de publicações cresceu quase que linearmente até por volta de 2015, quando passa a crescer com uma taxa menor, até que por volta de 2015 o número de publicações esta temática começa a cair. Uma possível razão para esse comportamento foi a necessidade de se desenvolver outros tipos de amplificadores para operar fora da Banda C, como os amplificadores Raman (operando na Banda S (*short*) - 1460 a 1530 nm) e os EDFAs modificados (Banda L (*long*) - 1565 a 1625 nm) até por volta de 2015. A própria maturidade da tecnologia dos amplificadores óticos, com muitas soluções chegando ao mercado, pode explicar a diminuição do número de publicações a partir de 2015.

Parece oportuno notar que este decréscimo

no número de publicações na maturidade é diferente do decréscimo verificado na obsolescência de uma tecnologia. Na maturidade, a tecnologia já é robusta o suficiente para ser incorporada em produtos. Desta forma, os desenvolvimentos são incrementais e há poucas publicações.

No caso da obsolescência, a tecnologia não é mais utilizada e as publicações relativas aos temas também são raras, mas por um motivo diferente do que acontece na maturidade. Os sistemas coerentes aparecem em publicações, ainda que de forma limitada, desde o final dos anos 1980. Houve certa estagnação entre os anos de 1995 a 2005 seguida por um expressivo crescimento no número de publicações. Isso ocorreu devido à combinação de diversos fatores: o desenvolvimento dos receptores coerentes, a utilização de DSP e correção de erro antecipada (*Forward-Error Correction - FEC*) e a adoção de formatos de modulação avançada com multiplexação por polarização. Há também um número limitado de publicações em sistemas submarinos e isso pode ser devido à natureza muito específica desta temática. O tema de conversão de comprimentos de onda (*wavelength conversion*) também se torna atrativo concomitantemente com a

<sup>2</sup>A modulação cruzada de fase (*Cross-Phase Modulation - XPM*) é, usualmente, a maior causadora de crosstalk não linear em sistemas WDM.

própria tecnologia WDM, uma vez que permite o relaxamento da restrição da continuidade dos comprimentos de onda nos nós de uma rede ótica.

Curiosamente, uma das tecnologias mais promissoras para a conversão de comprimentos de onda se baseia no efeito de mistura de quatro-ondas (*Four-Wave Mixing* - FWM). Este mesmo efeito pode ser responsável pelo *crosstalk* não-linear<sup>2</sup> em sistemas WDM. Contudo, é possível projetar um dispositivo, seja em fibra ou integrado, com baixa penalidade de *crosstalk*, para a conversão de comprimentos de onda.

A partir da segunda metade da década de 1990, com o estabelecimento da tecnologia WDM como chave para o transporte de grandes volumes de informação, todas as hierarquias digitais baseadas em TDM e no canal de voz da telefonia passam a ser clientes da rede ótica. Duas hierarquias foram padronizadas: a SONET (*Synchronous Optical Networking*) na América do Norte e a SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) na Europa e no Brasil.

Ambas eram adaptadas para o transporte de informação usando multiplexação estatística baseada na comutação de datagramas, uma vez que nesta época a Internet já havia se disseminado e crescia por todo o planeta, mas usando a infraestrutura legada da rede de telefonia. O interesse das pesquisas na área de SONET/SDH pode ser mensurado pelo número de publicações mostrado na Figura 2(b).

---

Ela também pode causar alargamento espectral, às vezes, em conjunção com a GVD. A XPM pode ser mitigada, por exemplo, com a aplicação de técnicas de DSP, como a *backpropagation*. Outros efeitos não lineares de relevância para sistemas WDM são: i) a automodulação de fase (*Self-Phase Modulation* - SPM), que atua na fase do próprio sinal, podendo causar alargamento espectral e ii) o Efeito Raman (Intrabanda e Interbanda). Uma discussão mais detalhada destes efeitos não-lineares foge ao escopo do presente artigo.

Simultaneamente ao interesse por SONET/SDH, apareceu uma nova tecnologia para o transporte assíncrono de datagramas em altas velocidades chamada de ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), que apesar de ter sido proposta em 1990, só foi despertar interesse alguns anos depois. A tecnologia ATM utilizava uma unidade de transporte de informação chamada célula, com 53 Bytes, que conseguia se adaptar bem à hierarquia SONET/SDH e surgiu como uma alternativa viável para o tráfego de pacotes. Entretanto, talvez pelo fato de ser baseada em *hardware* dedicado, as mudanças de infraestrutura acabaram não ocorrendo de maneira generalizada. Isso pode explicar a rápida queda no interesse por este assunto já a partir da primeira metade dos anos 2000, conforme mostrado na Figura 2 (b). No final da década de 1990, também começou-se a pensar em uma forma de realizar o transporte de informação no núcleo da rede ótica por meio de pacotes óticos, uma vez que a convergência de serviços de rede, independentemente da infraestrutura adotada, já era um dos objetivos a serem alcançados. Com isso, tecnologias na época vistas como promissoras foram a comutação ótica de pacotes (*Optical Packet Switching* - OPS) e a comutação ótica de rajadas (*Optical Burst Switching* - OBS). Contudo, como estas tecnologias dependiam de comutadores óticos ultrarrápidos e de memórias óticas, cujo desenvolvimento acabou não atendendo às expectativas criadas, o interesse por este assunto atingiu seu ápice por volta de 2009, quando também passa a sofrer do desinteresse crescente da comunidade científica. Paralelamente, o aparecimento da tecnologia de rede ótica elástica (*Elastic Optical Network* - EON), que permite a utilização mais eficiente do espectro ótico para múltiplos tipos de requisitos de banda, passou a ser vista como solução para alguns dos problemas que as tecnologias OPS/OBS prometiam resolver, com poucas adaptações de hardware em relação à tecnologia WDM.



Por isso, houve um súbito interesse por esta tecnologia a partir de 2010. Nessa época, a convergência dos diversos tipos de serviços para dados era uma realidade e uma solução de integração e encapsulamento, padronizada desde o início dos anos 2000 adquiriu mais relevância: a rede ótica de transporte (*Optical Transport Network - OTN*). Demandas mais exigentes em termos de banda e taxa de bits eram cada vez mais comuns, impulsionadas tanto pela grande variedade de serviços de Internet, a partir da segunda metade da década de 2000, como também pela popularização da telefonia móvel, que nesta época já migrava da segunda (2G) para a terceira geração (3G). Isso fez com que as técnicas de modulação multinível com detecção coerente fossem adotadas, assim como a infraestrutura de acesso tivesse que ser repensada. Em 12 de março de 2008, foi apresentada a primeira solução de transporte ótico coerente de 40G da indústria [11] [12]. Em 2009, a primeira rede ótica coerente 100G, da operadora Verizon, ligava Paris a Frankfurt, ao longo de 893 km [13]. O desenvolvimento de sistemas óticos coerentes continua de grande interesse, como pode ser visto na Figura 2(b). Para o acesso, a ideia principal era que a nova infraestrutura fosse independente da rede de acesso de telefonia ou da rede cabeada para o fornecimento da programação de TV por assinatura, sem a limitação que esses meios de acesso tinham para a entrega de altas taxas de bits. A proposta de uma rede ótica passiva (*Passive Optical Network - PON*) para o acesso aos usuários finais já existia desde a primeira metade da década de 1990, ganhando um pouco mais de destaque na segunda metade desta década. A tecnologia PON teve algumas variantes que procuravam adequar a tecnologia tanto com as interfaces encontradas como também com as taxas de bits requeridas,

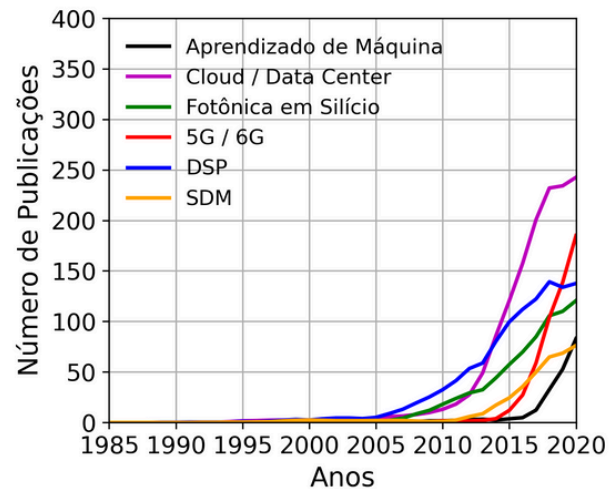


Figura 3. Média móvel de 5 anos referente ao número de publicações com abordagem de várias temáticas recentes em sistemas de comunicação ótica.

o que pode explicar o grande interesse até por volta do ano de 2015. Também a comunicação ótica no espaço livre (*FreeSpace Optical-communications-FSO*) teve grande apelo a partir de 2000, juntamente com PON e comunicação por luz visível (*Visible Light Communication - VLC*). Nos últimos anos tais tecnologias têm atraído interesse por conta da possível integração da iluminação com o transporte de informação.

Paralelamente ao desenvolvimento das tecnologias de acesso ótico, o acesso por meio da tecnologia móvel celular tem a implantação de sua quarta geração (4G) a partir de 2012, sendo que a implantação da quinta geração (5G) começa ao redor do ano de 2018. A partir da segunda metade da década de 2000, também há um grande movimento da comunidade científica de maneira a organizar o acesso remoto a informações previamente armazenadas, também permitindo a virtualização de recursos de rede. Essas áreas foram agrupadas na temática nuvem (*Cloud*) e *Data Center* e o número de publicações nesta área cresceu acentuadamente a partir do ano de 2012, conforme mostrado na Figura 3, assim

como as publicações em 5G/6G, que crescem acentuadamente a partir de 2016. Esse comportamento pode explicar, em parte, a diminuição do interesse por PON, e mesmo por EON, a partir de 2015. Outras tecnologias que tendem a melhorar equipamentos e a qualidade do sinal, como DSP e aplicações da Fotônica em Silício (*Silicon Photonics*), estão atraindo atenção crescente desde a segunda metade da década de 2000, conforme pode ser visto na figura 3. Tecnologias para multiplexação espacial (*Space Division Multiplexing - SDM*), usando múltiplas fibras óticas em um mesmo cabo, fibras óticas com múltiplos núcleos ou multiplexação modal, estão sendo abordadas de forma crescente desde o início da década de 2010 e, recentemente, técnicas de aprendizado de máquina (*Machine Learning*) têm sido de grande interesse, sendo usadas em diversas aplicações nas redes óticas.

### Considerações Finais

Tudo indica que os sistemas de comunicação ótica continuarão a desempenhar papel único como a verdadeira espinha dorsal das telecomunicações. Sem eles, não haveria desenvolvimentos como 5G/6G, conectividade global via cabos submarinos, veículos autônomos, cidades inteligentes, computação de alto desempenho com clusters e supercomputadores, computação e armazenamento em nuvem e muito mais. Haverá novos ciclos de tecnologias, por exemplo, com a viabilização, em larga escala, do processamento totalmente ótico de sinais com a Fotônica de Silício (ou outro material que garanta a compatibilidade com os padrões utilizados pela indústria de microeletrônica para a plataforma CMOS). Outra possibilidade, eventualmente, com a disseminação da SDM para a paralelização massiva e aumento da capacidade das redes óticas, dentre outras possibilidades.

De qualquer forma, a despeito dos desafios que o futuro reserve, é certo que sempre haverá luz adiante.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP pelo apoio às suas pesquisas, por meio dos processos 2015/24341-7, 2019/027720-7, 2022/14485-5.

### Referências

- [1] K.C. Kao, G.A. Hockham, "Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies", Proc. of the Institution of Electrical Engineers, Vol. 113, No. 7, pp. 1151 - 1158, Jul 1966.
- [2] A. Einstein, A., "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt". Annalen der Physik, Vol. 322, No. 6, pp. 132-148, Mar 1905.
- [3] A. Einstein, "Zur Quantentheorie der Strahlung", Physikalische Zeitschrift, Vol. 18, p.121. 1917
- [4] I. Hayashi, et al., "Junction Lasers Which Operate Continuously at Room Temperature", Appl. Phys. Lett. Vol. 17, No. 3, pp. 109-111, Aug 1970.
- [5] F. P. Kapron, et al., "Radiation Losses in Glass Optical Waveguides", Appl. Phys. Lett., Vol. 17, No. 10, pp. 423-425, Nov 1970.
- [6] G. Cancellieri, in *Single-Mode Optical Fibers*, Pergamon Press, 2014.
- [7] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, 7th ed., Cambridge University Press, New York, 1999.
- [8] J. I. Yamada, et al., "2 Gbit/s optical transmission experiments at 1.3  $\mu\text{m}$  with 44 km single-mode fibre", IET Elect. Lett., Vol. 17, No. 13, pp. 479-480, Jun 1981.
- [9] N. Chinone and M. Okai, in *Semiconductor Lasers: Past, Present, and Future (Chapter 2)*, AIP Press, Woodbury, NY, 1995.
- [10] L.G. Cohen, et al., "Tailoring zero chromatic dispersion into the 1.5-1.6  $\mu\text{m}$  low-loss spectral region of single-mode fibres", IET Elect. Lett, Vol. 15, No. 12, pp. 334 -335, Jun 1979.
- [11] "Nortel unveils 40/100G optical system, announces new customers," Lightwave Online, [Online]. Available: <https://encurtador.com.br/efpzO> [Acessado em 27/09/2023]



[12] "Nortel unveils 40/100G optical system, announces new customers," IEEE Communications Society, [Online]. Available: <https://www.comsoc.org/node/19246> [Acessado em 27/09/2023].

[13] "Verizon Deploys 100G Between Paris and Frankfurt," Telecom Ramblings, [Online]. Available: <https://encurtador.com.br/bGTVX> [Acessado em 27/09/2023].