



REVISTA DA

# sbfoton

Vol. 3 - Nov/2023

ISSN 2966-0726





Revista de divulgação  
científica da Sociedade  
Brasileira de Ótica e Fotônica

# Expediente

## Editor-chefe

Marcio Peron Franco de Godoy

**Corpo Editorial:** Alexandre de Almeida Prado Pohl, Cristiano Monteiro de Barros Cordeiro, Eduardo Fontana, Luciana Reyes Pires Kassab

**Colaboradores:** Camilla Teodoro e Raquel Q. Santos

## Autores dos artigos

Eric Alberto de Mello Fagotto, Guilherme R. da S. Mattos, Luciana R. P. Kassab, Luis A. Gómez Malagón, Luiz Henrique Bonani, Marcelo Luís Francisco Abbade, Olga C. Vilela, Phillip Rudge.

## Diretoria SBFoton

**Presidente:** Alexandre de Almeida Prado Pohl/ UTFPR

**Diretor Administrativo:** Diego José Rátiva Millan/ UPE

**Diretor de Relações Institucionais:** Denise Zezell/ IPEN

**Diretor de Relações com Empresas:** Manuel Steidle/ Fundação CERTI

**Diretor de Eventos:** Luiz Henrique Bonani do Nascimento/ UFABC

**Diretor de Publicações:** Marcio Peron Franco de Godoy/ UFSCar

**Diretor de Educação:** Alberto Paradisi/ Fundação CPqD

ISSN 2966-0726

Os artigos publicados nesta Revista representam a visão e opinião dos autores e podem não representar a opinião da Editoria da Revista.

## ENDEREÇO

Cidade universitária Zeferino Vaz, Av. Albert Einstein, 400.

Distrito de Barão Geraldo, CEP 13083-852 - Campinas - SP

# Carta do Editor

Próximos do final de um ano intenso, consolidamos mais uma edição da Revista da SBFoton. As tecnologias óticas e fotônicas avançam a passos largos e os resultados dos esforços e investimentos muitas vezes são latentes aos não-iniciados. Neste sentido, reforçamos o papel informativo de nosso periódico semestral que propicia uma leitura acessível a temas tão relevantes na vida moderna.

Esta edição, por exemplo, aborda aspectos estratégicos em duas vertentes: uma é a abordagem de otimização da eficiência de células solares através de seu recobrimento por materiais transparentes. A outra é o panorama histórico e tecnológico das comunicações óticas, tanto no Brasil como no Mundo, exibindo o “porquê” e “como” de cada etapa do desenvolvimento. Ao ler os três artigos desta edição, pode-se notar a importância do investimento em ciência e tecnologia e como o tempo necessário para a sua maturação não é instantâneo, o que implica na resiliência de todos os atores envolvidos.

Porém, os resultados são espetaculares! São avanços que, bem direcionados, propiciam a melhoria das condições de vida, ampliando o acesso a formas de geração de energia menos danosas para o meio-ambiente, aproveitando-se da luz solar, além da disseminação e acesso à informação de forma praticamente imediata. Todos os artigos são escritos por especialistas que contribuem na pesquisa e divulgação científica, aos quais somos imensamente gratos pela contribuição.

Estamos na fase de consolidação da revista e garantimos boa receptividade às críticas e sugestões.

Ótima Leitura,  
Marcio Peron Franco de Godoy



*Marcio Peron Franco de Godoy,  
Editor-Chefe*

# Mensagem do Presidente

Com muito orgulho a SBFoton lança o terceiro número de sua revista, que já consideramos um caso de sucesso. Neste edição ela conta com a contribuição de nossos associados Luciana Reyes Pires Kassab, Felipe Rudge Barbosa e Luis Henrique Bonani do Nascimento, que trazem uma visão sobre suas áreas de atuação. Sobretudo, agradeço o nosso querido editor, Prof. Marcio Godoy, que não tem poupado esforços para consolidar a revista da SBFoton como um importante meio de divulgação de assuntos sobre a Ótica e a Fotônica em nosso país.

Conclamo também nossos associados e leitores a enviarem novas contribuições, para que, de forma crescente, consigamos ampliar a divulgação de nossas pesquisas e atividades ao público interessado.

Desejo a todos uma agradável e instigante leitura!

Cordiais Saudações,  
Prof. Alexandre Pohl  
Presidente da SBFoton



*Alexandre Pohl,  
Presidente da SBFoton*

# SUMÁRIO

3

Carta do Editor

4

Mensagem do Presidente

6

Notícias da SBFoton

8

Aumento da eficiência de células solares usando materiais vítreos luminescentes como cobertura

13

Breve história de comunicações óticas de Mbps a Tbps: ênfase no cenário brasileiro

21

Sistemas de comunicação ótica: do surgimento à maturidade

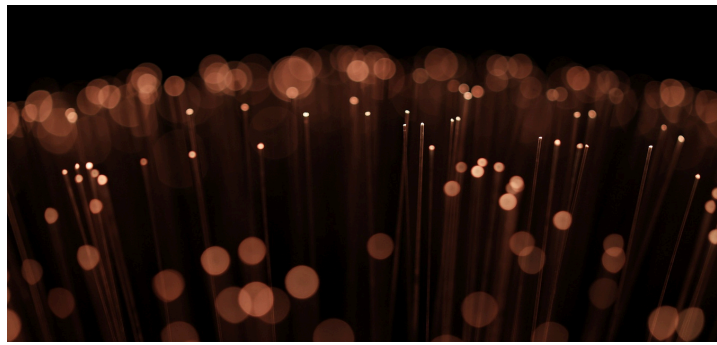
# Notícias da SBFoton

A SBFoton, fundada em 2017, é pessoa jurídica de direito privado, sob a forma de associação civil sem fins lucrativos, exclusivamente de caráter científico, tecnológico e de inovação. Seus objetivos são o incremento da pesquisa e inovação em ótica e fotônica e a criação no Brasil de um ambiente propício ao seu desenvolvimento.

Seus associados são docentes, pesquisadores, empresários, engenheiros, técnicos, estudantes e empresas, todos interessados no estudo, desenvolvimento e aplicação da luz em diversas áreas do conhecimento.

Você também pode ser parte desta sociedade.  
Associe-se em:

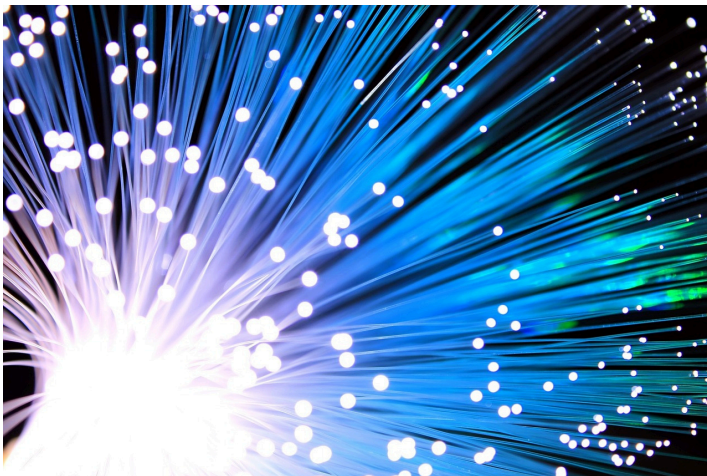
<https://www.sbfoton.org.br/associese>



## Newsletter

A *Newsletter da SBFoton* é um veículo de comunicação quinzenal com as principais notícias de Ótica e Fotônica do Brasil e do mundo. Com mais de 140 edições, conta com editorias especializadas em biofotônica, comunicações e redes óticas, lasers, ótica e instrumentação, ótica integrada e sensores. Além das notícias técnicas, divulga também convites para eventos, conferências e oportunidades profissionais e acadêmicas.

Acesse as edições anteriores e assine nossa *newsletter*.



## Eventos

Periodicamente, a SBFoton realiza eventos de forma presencial e remota. Destacam-se o encontro anual SBFoton Conference e os *webinars*. No caso dos eventos remotos, sua acessibilidade é aberta na página: <http://www.sbfoton.org.br/eventos/outros>

Thorlabs Brasil agora oferece:

# RECALIBRAÇÃO DE SENSORES!

Os sensores calibrados recebem um certificado no padrão NIST/PTB\* com duração de 1 ano!



\*Todos os nossos equipamentos usados para calibração são rastreáveis a padrões nacionais e internacionais (NIST e PTB) e são recalibrados periodicamente para manter os padrões exigidos.

**THORLABS**

**PEÇA JÁ A SUA COTAÇÃO!**

Nos envie um e-mail para [brasil@thorlabs.com](mailto:brasil@thorlabs.com) ou nos contate no telefone +55 (21) 2018 6490

# Aumento da eficiência de células solares usando materiais vítreos luminescentes como cobertura

Guilherme R. da S. Mattos<sup>a</sup>, Olga C. Vilela<sup>b</sup>, Luis A. Gómez Malagón<sup>c</sup>, Luciana R. P. Kassab<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

<sup>b</sup>Universidade Federal de Pernambuco

<sup>c</sup>Instituto de Inovação Tecnológica da Universidade de Pernambuco

<sup>d</sup>Faculdade de Tecnologia de São Paulo - Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza

## I. INTRODUÇÃO

Novos materiais vítreos têm contribuído significativamente para o desenvolvimento de instrumentos e dispositivos fundamentais para o avanço de diversas áreas da ciência e da engenharia. As descobertas da nanotecnologia também têm desempenhado papel importante em relação às fontes de energia renováveis. Devido à ausência de uma combinação perfeita entre o espectro solar e a capacidade de absorção das células fotovoltaicas (Figura 1), diversos estudos têm sido propostos com o objetivo de reduzir as perdas de eficiência decorrentes deste efeito. Uma abordagem promissora consiste no uso de materiais luminescentes nos quais fótons de alta energia são convertidos em fótons de menor energia (processo de conversão descendente de luz). Esse mecanismo pode resultar no aumento da eficiência das células solares quando materiais, como o vidro

dopado com íons de terras-raras (TRs), são empregados como cobertura sobre o dispositivo fotovoltaico [1–3].

Um fator importante no aumento da luminescência de íons de TRs é a escolha adequada da matriz hospedeira, que deve ter alta transmitância e baixa energia de fônons para reduzir processos por decaimento não radiativo. Dentre os materiais amplamente explorados na literatura para hospedar tanto íons de TRs quanto nanopartículas (NPs) de Au e Ag, destacam-se os vidros germanato e telurito. Estes vidros exibem características favoráveis, como baixa energia de fônon ( $\sim 700 \text{ cm}^{-1}$ ), ampla janela de transmissão (350–5000 nm), alto índice de refração (1,8–2,3), além de boa estabilidade química, térmica e mecânica, bem como excelente solubilidade de íons de TRs [1–3].

Devido a estas características, esses materiais têm se tornado candidatos promissores para serem usados como camada de cobertu-

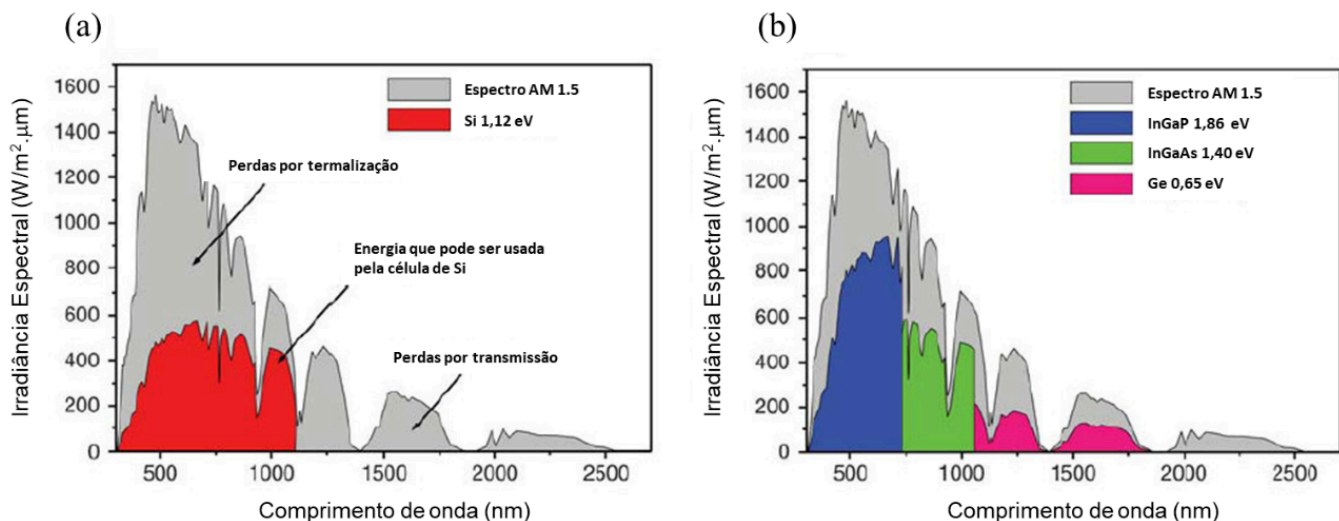


Fig. 1. Espectro solar AM1.5 e exemplos de resposta espectral da (a) célula solar de Si e da (b) célula solar de multijunção [4].



ra em células solares. Além disso, a combinação de íons de TRs com os efeitos plasmônicos de NPs metálicas, como o Au e Ag, pode aumentar significativamente a luminescência abrindo novas perspectivas para o desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos ainda mais eficientes.

## **Materiais e Métodos**

A preparação de amostras de vidros com características especiais exige o desenvolvimento de uma metodologia adequada. Mostraremos aqui os resultados de vidros germanato e teluritos, produzidos usando a conhecida técnica de fusão seguida de resfriamento rápido, com as seguintes composições (em % de peso): 40,0GeO<sub>2</sub>- 60,0PbO (GP) [1] e 38,6GeO<sub>2</sub> - 57,6PbO-3,8Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (GPA) [2], e vidros telurito com composição de 33,34 TeO<sub>2</sub>-33,33GeO<sub>2</sub>- 33,33PbO (TGP) [3]. Para a introdução dos íons de Eu<sup>3+</sup>, optou-se pelo uso do Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, enquanto que, para incorporar as NPs de Au e Ag, foram utilizados os reagentes Au<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e AgNO<sub>3</sub>, respectivamente. Assim sendo, os vidros GP foram dopados com 1,0% de Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 0,1% de Au<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, os vidros GPA com 1,0% de Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 0,5% de AgNO<sub>3</sub>, e, por fim, os vidros TGP com 1,0/5,0% de Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 0,5% de AgNO<sub>3</sub>. Os reagentes foram pesados em balança analítica e colocados em um cadinho de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (amostras GP) ou de Pt pura (amostras GPA e TGP). Em seguida, o cadinho contendo os reagentes foi colocado em forno tipo mufla e mantido durante o tempo necessário para a fusão e homogeneização dos reagentes: GP e GPA à 1200°C por 1h e TGP à 1050°C por 1h. O material fundido foi vertido rapidamente em um molde de latão previamente aquecido e então levado ao forno tipo mufla para ser submetido a tratamento térmico: GP e GPA à 420°C por 2 h e TGP à 380°C por 2h. Este tratamento térmico deve ser realizado para minimizar tensões internas na amostra, garantindo que

o vidro fique menos frágil e menos susceptível a trincas. As amostras foram submetidas ao processo de corte e polimento até alcançarem as dimensões aproximadas de 10,00 mm de comprimento, 4,00 mm de largura e 2,50 mm de espessura. Por fim, foram realizados tratamentos térmicos adicionais (12 h) somente para as amostras TGP preparadas com AgNO<sub>3</sub>. Cabe ressaltar que para todas as amostras preparadas com AgNO<sub>3</sub> e Au<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a nucleação das NPs metálicas se deu por redução térmica durante o tratamento térmico. Um microscópio eletrônico de transmissão (MET) de 200 kV foi usado para corroborar a nucleação das NPs metálicas de Au e Ag. As medidas de luminescência foram realizadas com arranjo experimental adequado (laser de diodo CW operando a 405 nm, filtros, monocromador e detector). Foram feitas caracterizações elétricas com dois tipos de dispositivos fotovoltaicos: para o grupo de amostras GP e TGP foi usada uma célula solar de Si policristalino e para os vidros GPA foi utilizada uma célula solar de multijunção (InGaP-InGaAs-Ge). A eficiência das células solares, com e sem a cobertura vítrea, foi determinada a partir dos resultados de corrente em função da tensão (I-V) obtidas usando simulador solar (LCS-100 Newport) com irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup> (AM1.5). Entre a célula solar e o vidro foi aplicada uma camada de óleo de imersão para microscopia ótica (índice de refração n=1,51) a fim de melhorar o acoplamento ótico do sistema. Este procedimento foi utilizado para reduzir as perdas por reflexão na interface entre a célula solar e o vidro. A Figura 2 apresenta a metodologia usada com a amostra vítrea posicionada sobre a célula solar. Todas as medidas foram realizadas à temperatura ambiente (25°C).

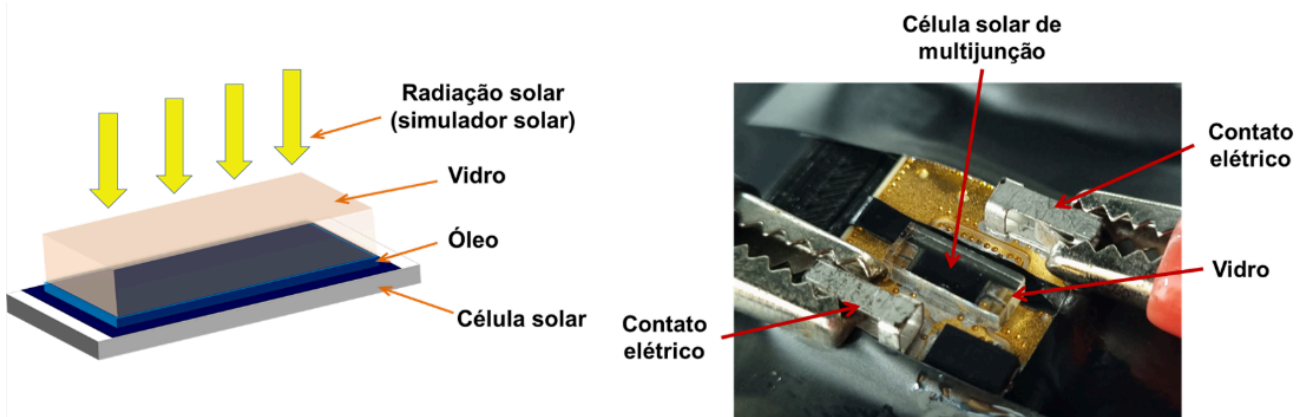


Figura 2 - Posicionamento da amostra vítrea sobre a célula solar.

## Resultados

No grupo de vidros GP, o maior aumento de eficiência ( $\Delta\eta$ ) da célula solar de Si foi de 18,4%, o que ocorreu usando como cobertura a amostra dopada com 1,0% de  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  e 0,1% de  $\text{Au}_2\text{O}_3$  (em % de peso). Este  $\Delta\eta$  foi atribuído principalmente ao maior aumento de luminescência, sobretudo da transição  $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$  (~70%), que foi assistido pelos efeitos plasmônicos das NPs de Au, como pode ser visto na Figura 3a.

A Figura 3b mostra o comportamento da luminescência das amostras de TGP e a influência do aumento da concentração de  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  e das NPs de Ag. Os melhores resulta-

dos de  $\Delta\eta$  para a célula solar de Si foram verificados para os vidros TGP com 1,0% de  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  e 0,5% de  $\text{AgNO}_3$  (2h de tratamento térmico) e com 5,0% de  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  e 0,5% de  $\text{AgNO}_3$  (14h de tratamento térmico), com aumentos de 11,4% e 11,8%, respectivamente. Como a eficiência das células solares depende da quantidade de fótons que chega ao dispositivo fotovoltaico, a transmitância da camada de cobertura também desempenha um papel importante e explica o  $\Delta\eta$  semelhante obtido para as células solares cobertas por ambos os sistemas vítreos: a amostra com 1,0% de  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  e 0,5% de  $\text{AgNO}_3$  apresentou maior transmitância em

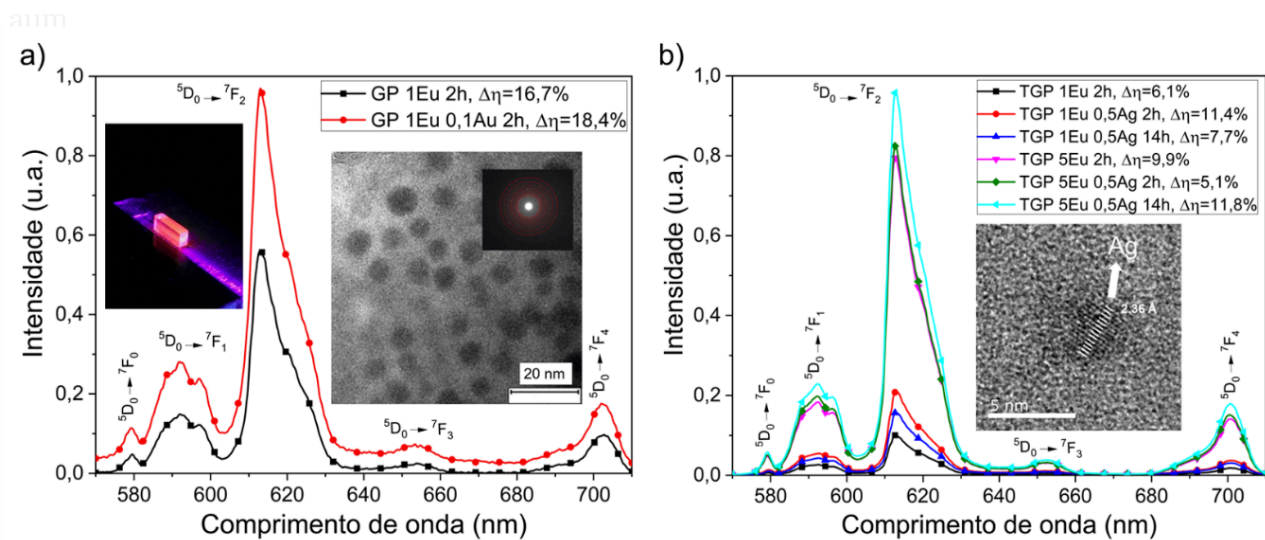


Figura 3 – a) Espectros de emissão (excitação em 405 nm) das amostras de vidro GP; o *inset* mostra uma imagem da amostra emitindo luz e uma imagem de MET das NPs de Au, presentes na amostra GP com 1,0% de  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  e 0,1% de  $\text{Au}_2\text{O}_3$ , e seu padrão de difração de elétrons. b) Espectros de emissão (excitação em 405 nm) das amostras de vidro TGP; o *inset* mostra uma imagem de MET da amostra TGP com 5,0% de  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  e 0,5% de  $\text{AgNO}_3$  14h, onde é possível visualizar uma das NPs de Ag e sua distância interplanar característica.

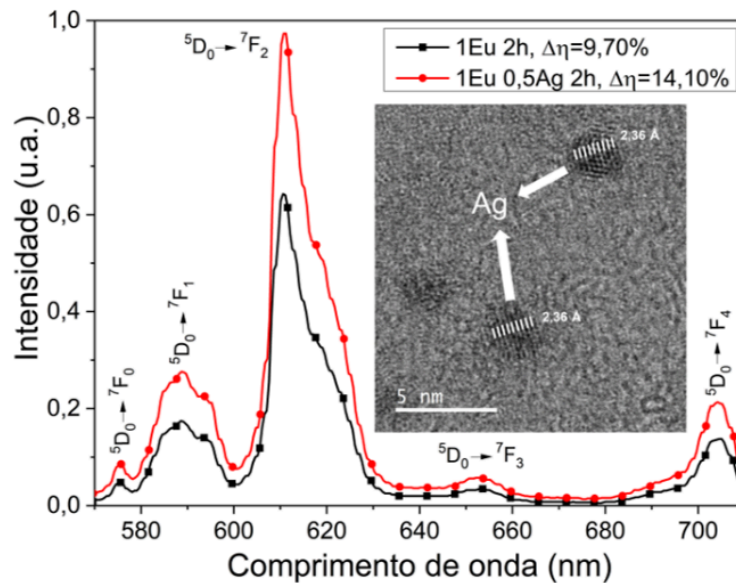


Figura 4 - Espectros de emissão (excitação em 405 nm) das amostras de vidro GPA; o inset apresenta uma imagem de MET da amostra GPA com 1,0% de  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  e 0,5% de  $\text{AgNO}_3$ , onde é possível visualizar as NPs de Ag e sua distância interplanar característica.

comparação com aquela com 5,0% de  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  e 0,5% de  $\text{AgNO}_3$ , que apresentou luminescência significativamente maior.

Em relação aos vidros GPA produzidos, também houve aumento de emissão para a amostra com 1,0% de  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  e 0,5% de  $\text{AgNO}_3$  quando comparada à amostra com 1,0% de  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  (Figura 4). Novamente, o maior aumento de eficiência da célula solar de multijunção (11,8%) foi obtido usando como cobertura a amostra com NPs.

## Conclusão

Foram demonstrados resultados de aumento de eficiência de uma célula solar de Si e de uma célula solar de multijunção, usando diferentes matrizes vítreas, dopadas com íons de  $\text{Eu}^{3+}$  com e sem NPs metálicas de Au e Ag, como camada de cobertura. Os efeitos plasmônicos das NPs metálicas desempenharam um papel importante no aumento da luminescência dos íons da TR, resultando em um impacto positivo nos processos de conversão descendente.

Além disso, a transmitância dos vidros produzidos foi considerada como outro fator relevante. Os resultados desta prova de conceito demonstram uma rota promissora para aprimorar o desempenho de dispositivos fotovoltaicos, a partir de diferentes mecanismos, que incluem o processo de conversão descendente e o aumento da luminescência assistida por plasmons. Cabe ainda destacar que a metodologia utilizada pode ser estendida a diferentes hospedeiros, íons de TRs e NPs.

Agradecimentos: INCT de Fotônica / CNPq (465.763/2014) e Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano/CNPEM) pela realização das análises de MET.

## Referências

- [1] GUNJI, R. M. *et al.* Germanate glass layer containing  $\text{Eu}^{3+}$  ions and gold nanoparticles for enhanced silicon solar cell performance. *Journal of Luminescence*, v. 226, p. 117497, 2020.

[2] MATTOS, G. R. S. et al. *Enhancement of multijunction solar cell efficiency using a cover layer of  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$  and  $\text{Eu}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$  doped  $\text{GeO}_2\text{-PbO-Al}_2\text{O}_3$  glasses as spectral converter of solar radiation.* *Optical Materials*, v. 132, p. 112833, 2022.

[3] MATTOS, G. R. S. et al. *Performance improvement of Si solar cell via down-conversion and plasmonic processes using  $\text{Eu}^{3+}$  doped  $\text{TeO}_2\text{-GeO}_2\text{-PbO}$  glasses with silver nanoparticles as cover layer.* *Journal of Luminescence*, v. 238, p. 118271, 2021.

[4] ROMÁN, J. M. *State-of-the-art of III-V solar cell fabrication technologies, device designs and applications.* *Advanced Photovoltaic Cell Design*, 2004.

#### **NOTA DO EDITOR**

As referências [2] e [3] foram reconhecidas recentemente pela editora Elsevier como associadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (ONU): “Ajudando a enfrentar alguns dos maiores desafios do mundo” (“*United Nations Sustainable Development Goals-SDG 7, helping to tackle some of the world's greatest*”)

# Breve história de comunicações óticas, de Mbps a Tbps: ênfase no cenário brasileiro

Phillip Rudge - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - Unicamp

**Resumo:** Trata-se este breve artigo de um relato quase pessoal, a partir da vivência do Autor nesse mundo das Comunicações Óticas há mais de 4 décadas. O principal motivador deste relato foi a celebração dos 40 anos do primeiro enlace de ComOpt no Brasil e na América Latina, e certamente no Hemisfério Sul deste planeta que habitamos. Naquele momento a taxa de transmissão pelo laser e fibra foi de 34 Mbps, altíssima pelos padrões da época (1982). Hoje, passadas 4 décadas, as taxas de transmissão por fibras óticas são de dezenas de Tbps, o que significa uma evolução por um fator de 1 milhão. Comunicações Óticas incluem hoje todas as tecnologias de Informação e Comunicação (TIC), *software* e *hardware* inclusos.

## Primórdios

Na década de 1960 ficou claro que as telecomunicações com fios de cobre e satélites logo chegariam à saturação (Fig.1). Laboratórios de pesquisa em ambos os lados do Atlântico envolveram-se na busca de soluções. Considerando-se que seria necessária uma evolução para frequências acima de microondas, a Ótica era a única solução. Fibras de vidro de baixa atenuação foram buscadas desde 1966, a partir de uma proposta de Charles Kao [1]. Lasers de todos os tipos e tamanhos já existiam na segunda metade dos anos '60, mas era necessário que fontes de luz para essa aplicação deveriam ter tamanho reduzido, e com possibilidade de integração com a eletrônica de estado sólido, que se iniciava também. A opção vencedora foi naturalmente o laser de semicondutores

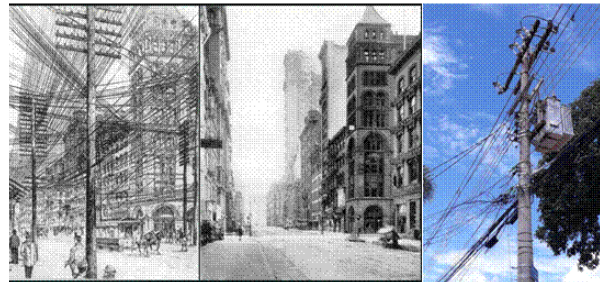


Fig.1 – a) em New York, EUA, já na virada séc.XIX – XX, logo se percebeu pelo volume de cabos telefônicos e pelo clima com muita neve em prolongados invernos, que os cabos deveriam ser subterrâneos. E com o passar do tempo não havia mais espaço para o volume de cabos de cobre. Um outro meio era necessário. Uma única fibra ótica transporta informação de milhares de cabos de cobre. b) no Brasil, devido ao clima tropical, as redes urbanas permanecem aéreas, exceto nos grandes centros urbanos.

ou diodo laser, já demonstrado operacional em 1962. Pronto, o caminho a seguir estava estabelecido.

Em 1970 foram afinal disponibilizados nos EUA a fibra ótica de “baixa” atenuação [2] (na época ~20dB/km, valor que nenhum meio material de transmissão chegava nem perto, e o vácuo não era uma opção); e quase simultaneamente o laser semiconductor funcionando à temperatura ambiente. Assim, ficou o ano de 1970 considerado o ano de nascimento das Comunicações Óticas.

No Brasil criava-se a Telebrás em 1972. A Telebrás (Telecomunicações Brasileiras S.A.) foi uma empresa estatal federal *holding* de telecomunicações, que unificou e impulsionou o setor no Brasil de norte a sul. As suas subsidiárias eram as companhias telefônicas estaduais, e a Embratel (esta operando exclusivamente em longa distancia interestadual e inter-

nacional). Sendo uma das poucas estatais lucrativas, logo em 1973 teve folga financeira para investir em P&D, sendo um de seus programas pioneiros justamente Comunicações Óticas. Como não tinha laboratórios, criou programas nas universidades: na Física e na Engenharia da recém-criada Unicamp (inaugurada em 1966); na Engenharia da USP; e no Centro de Estudos em Telecom (CETUC) da PUCRJ.

### **O CPqD:**

Visionários da época no Brasil logo perceberam que para “funcionar pra valer”, o esforço de P&D tinha que se estender às indústrias. Nesses tempos, o ambiente acadêmico estava a anos-luz de distância do mundo real, das soluções práticas e da atividade industrial. Então um novo modelo tinha que surgir. A partir de soluções tecnoeconômicas no exterior, ficou clara a necessidade de criação de um centro governamental específico para tornar ideias e protótipos de laboratório em produtos industrializáveis, que efetivamente suprissem a demanda dos sistemas de telecomunicações com soluções brasileiras, com dinheiro brasileiro, fechando o circuito pesquisa-desenvolvimento-produção-venda. Assim criou-se em 1976, dentro da Diretoria de Planejamento e Inovação da Telebrás, o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CPqD). Pronto, o primeiro passo para o estabelecimento dos caminhos e tecnologias nacionais estava dado. E com muito dinheiro garantido. E dentro de uma empresa séria, não subordinada a um órgão qualquer do governo federal. A cidade escolhida para sediar o amplo campus do CPqD foi Campinas, cidade próspera e autônoma do interior de São Paulo, mas próxima da capital. Campinas começava a receber várias indústrias de transformação, e de alta tecnologia; além de ter um dos maiores aeroportos do país

e que se destacava como maior centro de carga da região sudeste. Ali já estava também desde 1966 a Unicamp, universidade nascida com viés de pesquisa e desenvolvimento, além de sua função precípua de ensino e formação acadêmica e profissional. O modelo funcionou perfeitamente, e o CPqD continua hoje, quase 50 anos depois, como fonte de tecnologia e inovação, e referência internacional nas suas áreas de atuação.

### **Universidades e Indústria:**

O modelo de transferência de tecnologia exigia que se disponibilizasse no âmbito do CPqD protótipos operacionais direcionados à industrialização. Nesse amplo sentido, era necessária a montagem de laboratórios com metas e prazos realistas, mas obedecendo a critérios internacionais de qualidade e desempenho. Isso já era feito no âmbito da Petrobrás, mas em Telecom era absolutamente novo. Portanto as pesquisas iniciais e os primeiros protótipos deveriam ser realizados nas universidades, depois transferidos “automaticamente” pra o CPqD, que desenvolveria os protótipos operacionais, os ensaios de confiabilidade e o enquadramento em padrões de qualidade. Nada disso havia jamais sido feito em paragens tropicais. Um esforço hercúleo, muito bem orquestrado e administrado, e bem sucedido!

A partir dos laboratórios dos Departamentos de Física Aplicada e Eletrônica Quântica (IFGW-Unicamp), saíram os primeiros protótipos lasers semicondutores e fibras óticas, respectivamente. Esses primeiros passos foram repassados aos laboratórios de Optoeletrônica e Fibras Óticas, no CPqD, que desenvolveram em parceria com os laboratórios universitários, os protótipos operacionais, os ensaios de confiabilidade

e o enquadramento em padrões de qualidade. Anos depois, essas tecnologias foram objeto de transferência tecnológica para indústrias qualificadas, fechando o ciclo pesquisa-desenvolvimento-produção-venda. Os produtos eram vendidos para todas as empresas operadoras de telecomunicações.

### Primeiro ensaio de campo:

Nesse ambiente dinâmico e produtivo, surgiu naturalmente a necessidade de demonstrar soluções tecnológicas no mundo real. Os conhecidos testes de campo – a hora da verdade!

E o primeiro teste de campo de um sistema de comunicações óticas foi justamente no Rio de Janeiro, entre duas centrais telefônicas em Jacarepaguá. Estávamos em meados de 1982, e o sistema consistia de um enlace bidirecional de aproximadamente 5 km (denominado ECO-1), com fibras multimodo, lasers semicondutores na faixa de 850 nm (GaAs), e sistema de

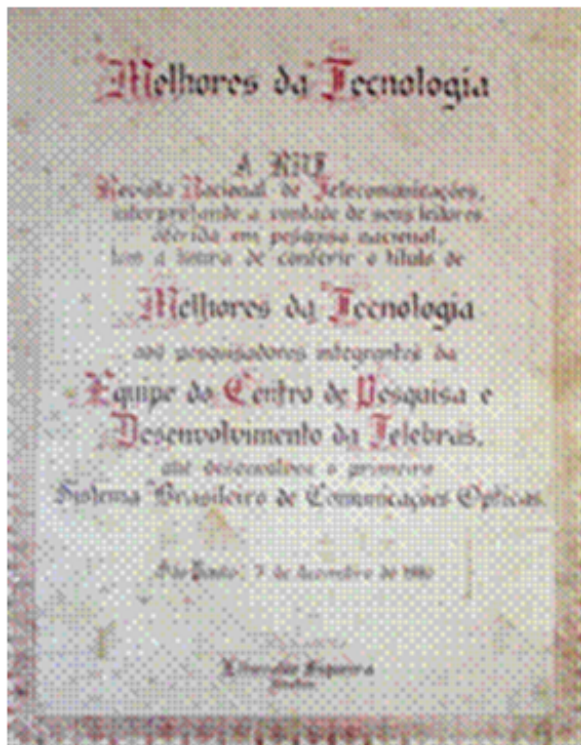


Fig. 2 – Diploma conferido ao CPqD em 1982 pela bem-sucedida realização do Primeiro Teste de Campo de um Enlace de Comunicações Óticas

modulação direta em PCM ( *pulse code modulation*). As fibras e os lasers foram fabricados nos laboratórios do CPqD, bem como as placas eletrônicas PCB, com os sistemas de modulação PCM desenvolvidos na Unicamp. Esse teste de campo foi conduzido pelas equipes do CPqD [Fig.2]; e a taxa de modulação de transmissão dos pulsos laser nesse enlace de linha ótica, era a assombrosa tecnologia digital de 34 Mb/s (também conhecido como ELO-34), muito maior do que qualquer taxa de transmissão funcionando no país, e em par com as mais altas taxas digitais no ambiente internacional. Pronto, o Brasil estava dentro do cenário mundial de ComOpt. Não eram mais experiências controladas em ambiente de laboratório, com ar condicionado e portas fechadas. Eram um enlace real, com tráfego real, em uma rede externa, numa grande metrópole.

### Desenvolvimentos:

Enquanto isso desenvolviam-se nos laboratórios do CPqD e da Unicamp, novas fibras, novos lasers, e novas tecnologias de encapsulamento e montagem de lasers semicondutores-condutores, até então atividades tecnológicas inexistentes no país.

Os lasers semicondutores são minúsculos componentes optoeletrônicos, do tamanho de um grão de sal, e fabricados em laboratórios com salas limpas de grau eletrônico (o mesmo de circuitos integrados); foram evoluindo de estruturas simples em compostos de GaAs/GaAlAs (emissão em 850 nm) para estruturas complexas em InP/InGaAsP (emissão em 1300 nm e depois em 1550 nm) [3]. Esses valores eram ditados justamente pelo que chamamos janelas de transmissão das fibras óticas de vidro [Fig.3].

As fibras óticas de vidro – finíssimos fios do tamanho de um fio de cabelo humano, e com dezenas de km de extensão – são

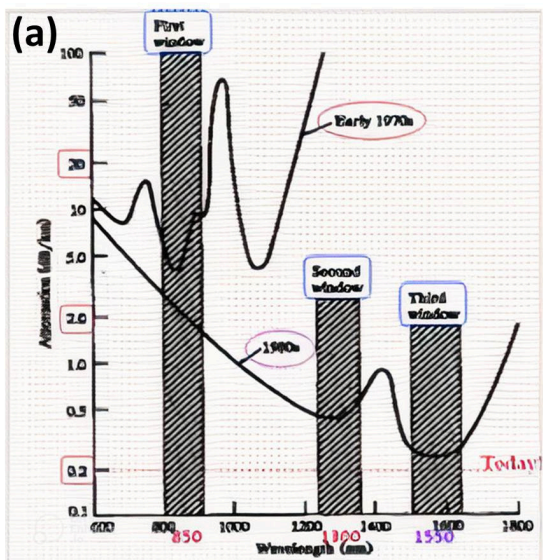


Fig.3 – (a) Atenuação de fibras óticas de sílica [3]. A primeira janela é em torno de 850 nm; a segunda em torno de 1300 nm; e a terceira no entorno de 1550 nm, sendo que hoje estende-se aproximadamente de 1460 a 1620 nm; b) Comparação entre fibras óticas (125 μm) e um fio de cabelo humano (80 μm).

fabricadas a partir do composto sólido mais abundante no planeta: areia! Lógico que não é areia da praia... e sim sílica ( $\text{SiO}_2$ ), na forma de quartzo ultra-puro. Os grandes desafios tecnológicos que foram vencidos e permitiram a existência das fibras atuais, foram a purificação dos vidros em um grau jamais imaginado possível, e a própria tecnologia de puxamento das preformas de fabricação [5].

Para o experimento original acima mencionado, o sistema de modulação PCM foi integralmente desenvolvido na Fec- Unicamp [6]. O sistema consiste de uma placa PCB, montada com componentes discretos e circuitos integrados, na qual é

inserido o laser semiconductor, devidamente encapsulado [7] e acoplado com fibra ótica; formando o transmissor (Tx). Esta fibra é conectada ao cabo ótico que vai pra rua. Na recepção, um circuito equivalente recebe o sinal da fibra num fotodetector de Si, que transforma os pulsos óticos em pulsos de corrente elétrica, que por sua vez são entregues ao circuito digital receptor (Rx).

### Evolução e Panorama atual:

Os sistemas e enlaces evoluíram durante a década de 1980, desde enlaces com fibras multimodo operando em 850 nm e taxas até 34 Mb/s, conforme relatado acima, passando a fibras monomodo operando em 1300 nm e taxas até 140 Mb/s, em meados da década. Nessa época começou uma outra revolução. Começaram a aparecer os lasers de 1550 nm, com confiabilidade e reprodutibilidade, que operavam justamente na janela de mais baixa atenuação possível no vidro  $\text{SiO}_2$ , atenuação esta que começava a chegar aos 0,25 dB/km, o que significava um ganho de 100 vezes na atenuação logarítmica (dB). E os sistemas digitais de modulação evoluíram para o conhecido sistema SDH (*synchronous digital hierarchy*), inicialmente em 155 Mb/s, evoluindo para 622 Mb/s, e 2,5 Gb/s, ao final da década.

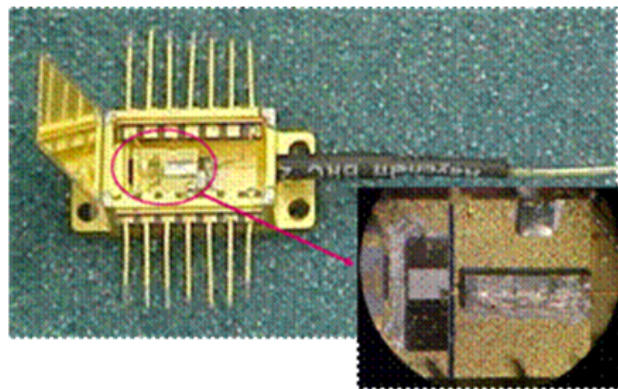


Fig.4 – Laser semiconductor encapsulado [7]. O encapsulamento é metálico hermético, garantindo total isolamento ambiental do laser, inclusive temperatura.



Nesse ponto – final dos anos 1980 -- surgiram os primeiros amplificadores óticos a fibra, os EDFAs (*erbium-doped fiber amplifier*) ou AFDE em português. Operavam (não por acaso...) justamente na janela de 1550 nm. Pronto. Mais uma revolução. Os enlaces tradicionais laser-fibra-fotodetector, que atingiam distâncias típicas de 10-20 km em 1300 nm, saltaram pra 40-50 km em 1550 nm, com amplificação ótica contínua de até 30 dB. O CPqD foi responsável pela implantação dos primeiros enlaces amplificados óticamente [8]. O primeiro realizado já em 1991, foi entre Campinas (claro) e São Paulo (capital). O sinal amplificado (ainda de 155 Mb/s, neste primeiro enlace) saía de uma central *tandem* em Campinas, seguia num cabo ótico subterrâneo até Jundiaí (aproximadamente 45 km); lá o sinal era aberto para distribuição e inserção do tráfego da região, multiplexado e seguia novamente amplificado, para São Paulo; de lá o sinal de retorno, seguia de volta a Campinas pela mesma rota, mas não pela mesma fibra. Outras fibras e outros amplificadores eram necessários no canal de retorno. Cada fibra tem seus amplificadores, mas as múltiplas fibras de um enlace estão frequentemente no mesmo cabo ótico. Alguns anos depois, já em meados dos anos 1990, surgiram mais duas revoluções. Os sistemas WDM e os cabos óticos submarinos. Os sistemas WDM (multiplexação por divisão de comprimento de onda, em português/brasileiro) consistem em agrupar numa mesma fibra múltiplos comprimentos de onda, originários de diferentes lasers, com diferentes sinais com taxas e formatos diferentes. Isto permite que uma mesma fibra transporte dezenas de sinais diferentes sem nenhuma interferência entre eles. Este é o processo de multiplexação. Assim, sinais de 2,5Gb/s (altíssima taxa nesta época) podem ser a-

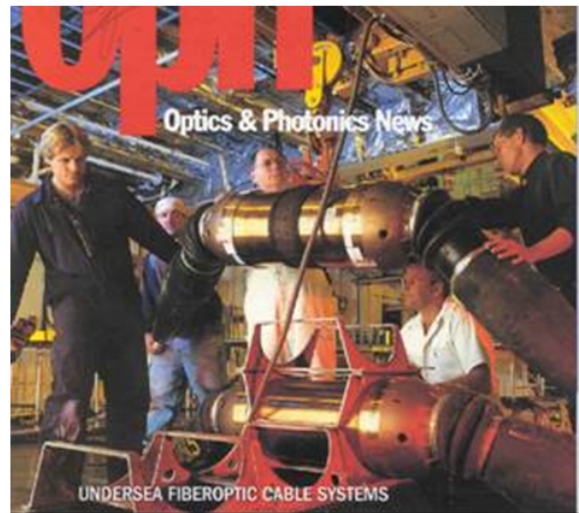


Fig.5 – Cabo submarino com estagio de amplificação bidirecional. Foto tirada já no porão do navio; o cabo próprio (cor branca) aparece na mão do técnico atrás, em pé. ©OSA/Optica

grupados em 10 ou 20 comprimentos de onda (ditos *lambdas*) transmitindo assim agregados de 25 ou 50 Gb/s (nessa época). Os cabos submarinos foram viabilizados graças à existência dos amplificadores óticos (os EDFAs). Na Fig.5 vemos ilustrado um cabo submarino com o respectivo estágio de amplificação. Os cabos são alimentados remotamente a partir das extremidades e tem tipicamente 12 pares de fibras, o que significa 24 amplificadores, 12 em cada direção. Os cabos costeiros não têm amplificadores na linha – sinais são amplificados na saída e na chegada – e perfazem tipicamente 150 km. Mas os cabos transcontinentais cobrem distâncias de milhares de km, atravessando oceanos de costa a costa, e os necessários estágios de amplificação ótica são espaçados tipicamente 50 km, o que significa que um único cabo com 2000 km de extensão terá quase mil amplificadores!! Ou seja, são sistemas complexos, caríssimos e que exigem altíssima confiabilidade de todos os componentes, peças e partes. São comparáveis à tecnologia aeroespacial, e são capazes de transportar capacidades de transmissão nunca imaginadas antes, e

que os sistemas de satélite jamais conseguiriam alcançar. Isso está ilustrado na Fig.6.

Assim chegamos finalmente ao panorama atual, onde não só as redes de longa distância e altas taxas de agregação se apresentam plenamente desenvolvidas e abrangendo todo o planeta, como também as redes locais e metropolitanas são completamente servidas pelos sistemas óticos. Nas redes metropolitanas de distribuição e acesso tem-se taxas locais de até 10 Gb/s, com taxas aos pequenos e médios usuários de até 1Gb/s; nas redes tronco metropolitanas temos agregação por multiplexação eletrônica em taxas de 40 e 100 Gb/s, num único *lambda*! (aliás, as interconexões dos usuários com os modernos *datacenters* são feitas nesses agregados, o que significa que milhares de usuários estão sendo atendidos simultaneamente em frações de segundo!). Soma-se a isso que múltiplos *lambdas* podem estar sendo utilizados em múltiplas fibras e os agregados atingem facilmente centenas de Gb/s de taxa de transmissão; isto é, milhões de usuários atendidos em frações de segundo.

Nos sistemas de longa distância (terrestres e submarinos) a agregação é maior ainda, atingindo 100-200 Gb/s em cada *lambda*, com agregados WDM de 40-60 (até 80) canais óticos, perfazendo assim dezenas de Terabits (Tb/s) !! Estes são os valores que temos nos enlaces tronco de altíssima capacidade, estendendo-se por centenas ou mesmo milhares de km.

Graças a esses sistemas óticos de altíssima capacidade, confiabilidade e permanência é que podemos ter a Internet e todos os sistemas de comunicação nos níveis atuais, e evoluindo! Sem as tecnologias óticas, sendo a fibra ótica a grande estrela, nada do que temos hoje seria possível.

Apesar dessas maravilhas, resta a questão do conteúdo que circula nessas redes. Aí não é mais uma questão do valor intrínseco dessas (e das suas correlatas), e sim do uso social que é feito delas. Mas essa questão foge ao escopo deste trabalho!

Ressalva:

O livro citado na ref.[5] faz uma ampla cobertura das décadas de 1970-1980,

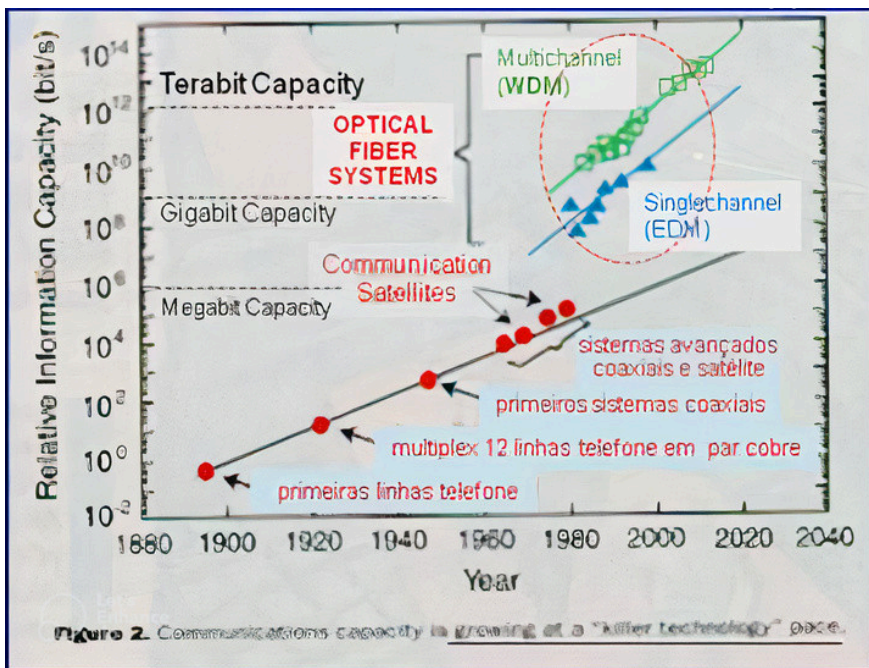


Fig.6 – Evolução dos sistemas de telecomunicações.

As Comunicações Óticas representam uma revolução, não apenas uma evolução. @PhysicsToday.

inclusive do ambiente sócio-político da Brasil, e aborda também em mais detalhe o evento destacado aqui do enlace ECO-1, de 1982. Os autores, este e aquele, compartilharam da mesma época, e em parte dos mesmos grupos e empresas.

Mas são enfoques diferentes e vivências diferentes. Ambos originais; não houve plágio de nenhuma das partes, embora hajam relatos similares de vários dos eventos citados.

Recomendamos a busca e leitura daquela obra de valor.

### Referências:

[1]Charles Kao, *Optical Fiber Systems*, 2<sup>nd</sup>.ed., McGraw-Hill, New York, 1989. [1933-2018, Nobel em Física, 2009]

[2]Corning Glass Works, Corning NY, USA.

[3]Gerd Keiser – *Optical Fiber Communications*, McGraw-Hill, New York; 2<sup>nd</sup>.ed., 1991; 3<sup>rd</sup>.ed., 2000; 4<sup>th</sup>.ed., 2010;

[4]Francisco C. Prince, “Fabricação e caracterização de lasers semicondutores de InGaAsP/InP em 1,3  $\mu\text{m}$ ”

[<https://doi.org/10.47749/T/Unicamp.1981.52521> ]

[5] Francisco M. Smolka, ‘Histórias da Fibra Ótica no Brasil’, Ed.Telha, Rio-RJ, 2023

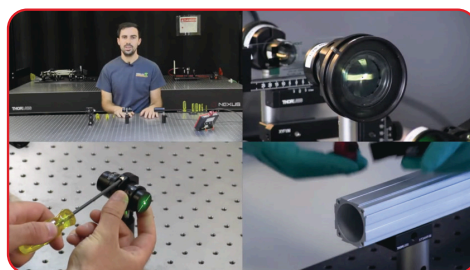
[6]Regge Scarabucci, “Desenvolvimento de sistemas de modulação digital para Comunicações Óticas: projeto PCM”, Feec-Unicamp, 1980.

[7]F.Rudge Barbosa, tese doutorado, <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1579650> ; e Notas de aula, FEEC-Unicamp, <https://www.dsif.fee.unicamp.br/~rudge/>; 2022.

[8]João B. Rosolem, “Enlaces Óticos Amplificados: desenvolvimento e aplicações”, CPqD-Telebras (atual Fundação CPqD), 1991.

Insights no nosso site –  
sempre novos vídeos com dicas

Legendas em Português!



Email: [brasil@thorlabs.com](mailto:brasil@thorlabs.com) | Vendas: +55 (21) 2018 6490 | [www.thorlabs.com](http://www.thorlabs.com)

2024 SBFoton International Optics and Photonics Conference  
Salvador - Bahia  
11 a 13 de novembro de 2024

*Call for Papers*

# 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-

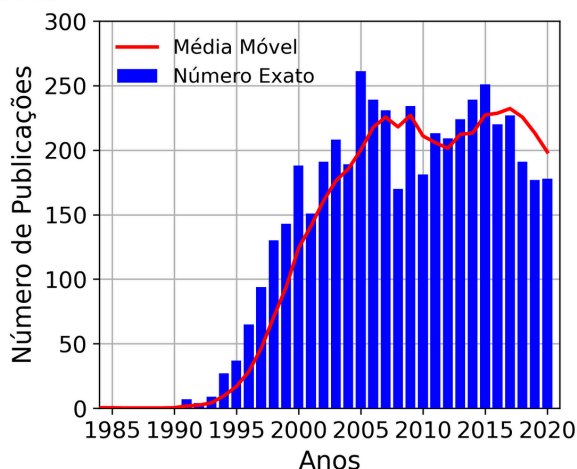


Figura 1. Número de publicações com a temática WDM e a média móvel de 5 anos.

<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.



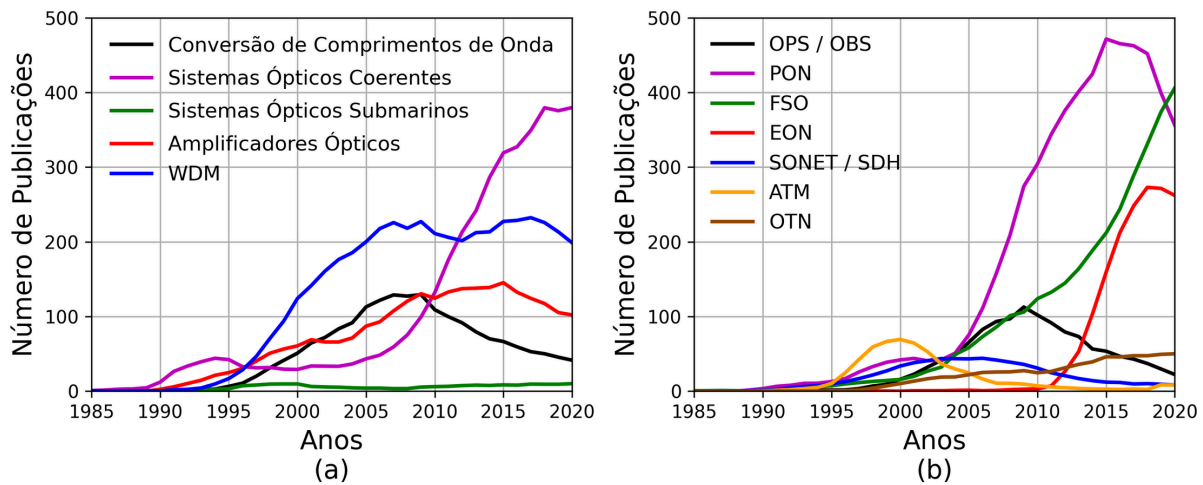


Figura 2. Média móvel de 5 anos referente ao número de publicações com abordagem de várias temáticas (a) na infraestrutura das redes óticas e (b) na operação das redes óticas.

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,

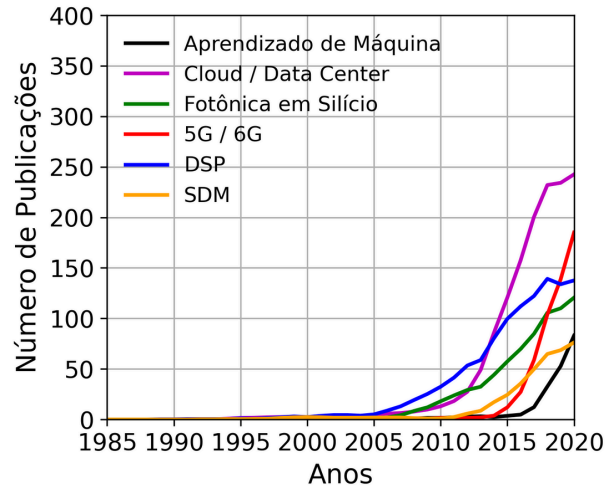


Figura 3. Média móvel de 5 anos referente ao número de publicações com abordagem de várias temáticas recentes em sistemas de comunicação ótica.

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].



REVISTA DA

**sbfoton**

Vol. 3 - Nov/2023

[sbfoton.org.br](http://sbfoton.org.br)

