

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 semicondutor 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 e sistema de

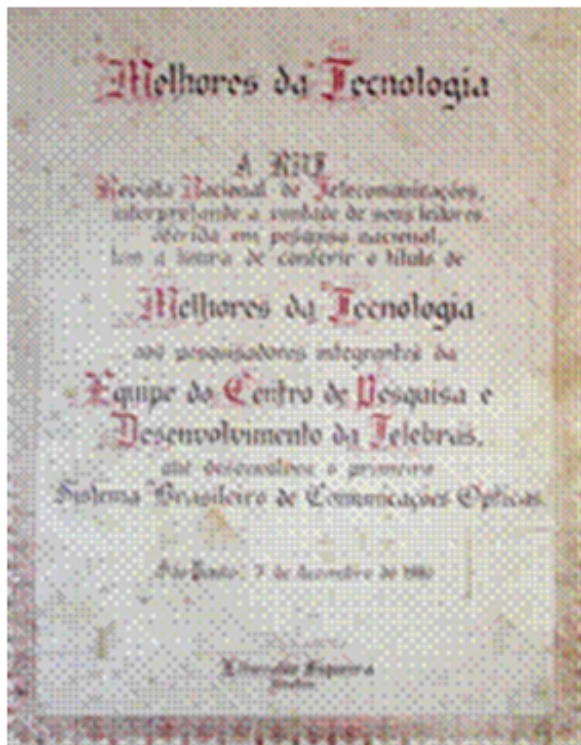


Fig. 2 – Diploma conferido ao CPqD em 1982 pela bem-sucedida realização do Primeiro Teste de Campo de um Enlace de Comunicações Óticas

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

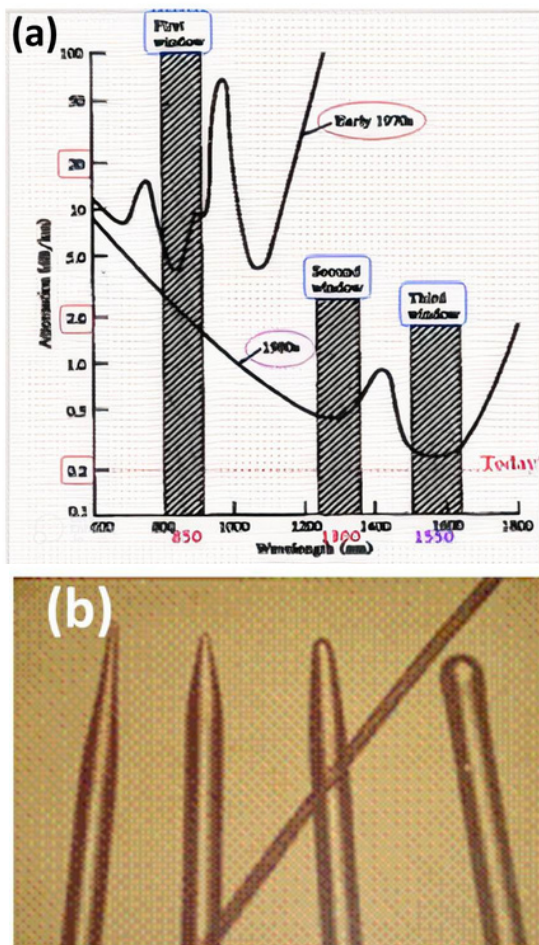


Fig.3 – (a) Atenuação de fibras óticas de sílica [3]. A primeira janela é em torno de 850 nm; a segunda em torno de 1300 nm; e a terceira no entorno de 1550 nm, sendo que hoje estende-se aproximadamente de 1460 a 1620 nm; b) Comparação entre fibras óticas (125 μm) e um fio de cabelo humano (80 μm).

fabricadas a partir do composto sólido mais abundante no planeta: areia! Lógico que não é areia da praia... e sim sílica (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 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.

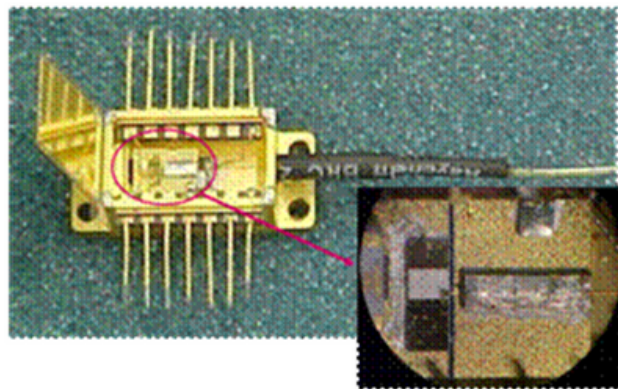


Fig.4 – Laser semiconductor encapsulado [7]. O encapsulamento é metálico hermético, garantindo total isolamento ambiental do laser, inclusive temperatura.

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-

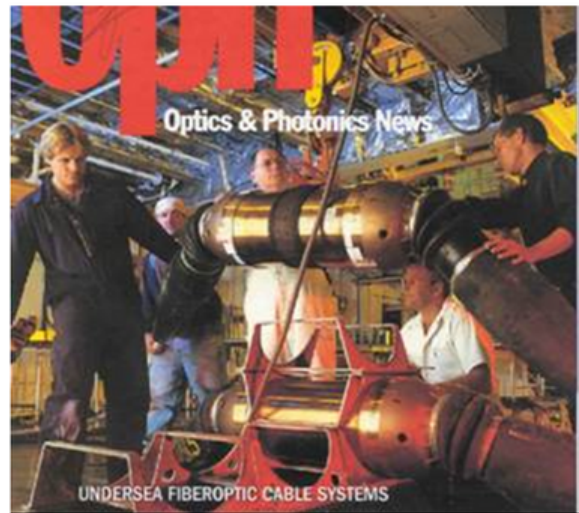


Fig.5 – Cabo submarino com estagio de amplificação bidirecional. Foto tirada já no porão do navio; o cabo próprio (cor branca) aparece na mão do técnico atrás, em pé. ©OSA/Optica

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,

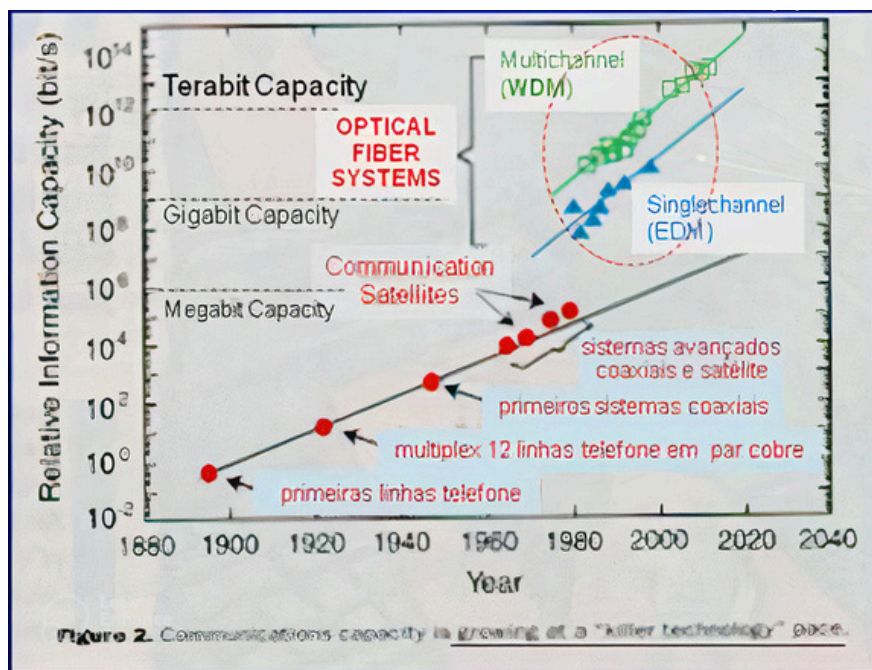


Fig.6 – Evolução dos sistemas de telecomunicações.

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*, 2nd.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; 2nd.ed., 1991; 3rd.ed., 2000; 4th.ed., 2010;

[4]Francisco C. Prince, “Fabricação e caracterização de lasers semicondutores de InGaAsP/InP em 1,3 μm ”

[<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.