



# Inteligência Artificial em Comunicações Ópticas

Tiago Sutili, Eduardo S. Rosa, Yesica R. R. Bustamante, Rafael C. Figueiredo  
CPQD, Soluções em Comunicações Ópticas - Campinas, SP, Brasil

**RESUMO:** A evolução das telecomunicações permitiu a transição das redes telegráficas para uma infraestrutura global altamente conectada. Essa transformação foi impulsionada pelos enlaces ópticos, que utilizam a luz para transmitir dados em altíssimas velocidades e grandes distâncias. Além de suportar volumes massivos de informação, os sistemas ópticos se destacam pela flexibilidade, eficiência energética e dimensões reduzidas. Isso os tornou a opção mais viável para diversas aplicações, desde conexões intercontinentais até redes metropolitanas e acesso direto ao consumidor final.

**ABSTRACT:** The evolution of telecommunications has enabled the transition from telegraph networks to a highly connected global infrastructure. This transformation was driven by optical links, which use light to transmit data at very high speeds and great distances. In addition to supporting massive volumes of information, optical systems stand out for their flexibility, energy efficiency and reduced dimensions. This made them the most viable option for various applications, from intercontinental connections to metropolitan networks and direct access to the end consumer.

---

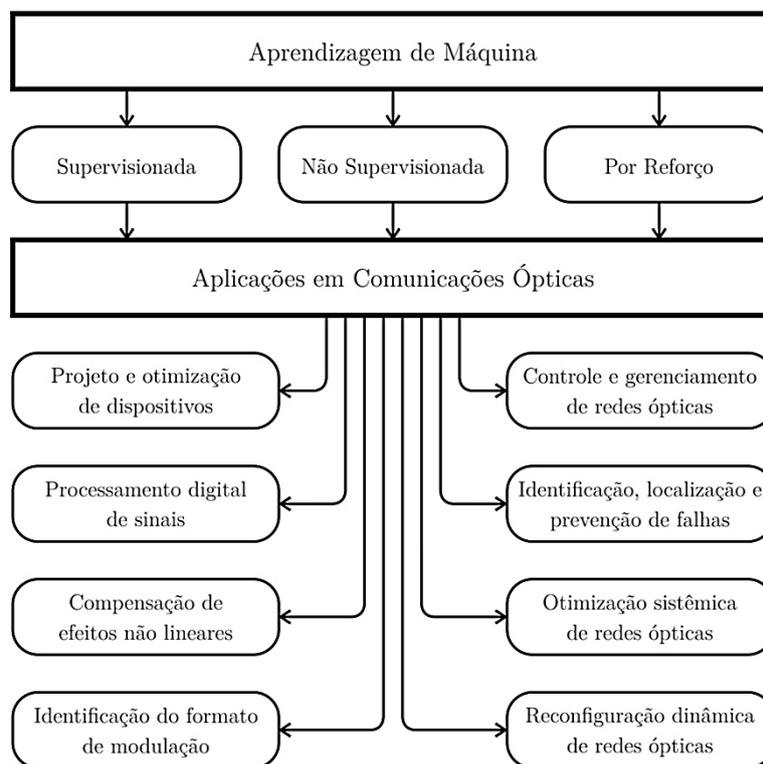
<http://doi.org/10.5281/zenodo.14920892>



Para suportar uma sociedade crescentemente conectada, as últimas décadas demandaram um ciclo virtuoso de revoluções científicas, seguidas pelo desenvolvimento de novos paradigmas tecnológicos, permitindo que a infraestrutura global de telecomunicações evoluísse das primeiras redes de telégrafos para um sistema capaz de interconectar continentes e países de maneira transparente para o usuário final. Na prática, tal estrutura depende, fundamentalmente, dos enlaces ópticos de comunicação, os quais exploram nossa capacidade de manipular e guiar a luz para a transmissão de canais modulados a centenas de gigabits por segundo (Gb/s) com alcance de milhares de quilômetros, atingindo taxas agregadas de centenas de *terabits* por segundo por fibra óptica e *petabits* por segundo por cabo instalado, que tipicamente é composto por várias fibras. Além de possibilitar o tráfego de um volume de informações inviável para outras tecnologias, os sistemas ópticos também se tornaram dominantes dada a possibilidade de serem reconfigurados, com a adição e retirada de canais em estações intermediárias, pelo baixo consumo energético considerando a taxa e alcance das transmissões realizadas e pelas dimensões e peso do próprio meio de propagação dos sinais ópticos. Em específico, tais características fizeram com que conexões ópticas se tornassem a melhor solução em termos de custo-benefício para cenários de aplicação com alcances progressivamente menores, passando a dominar não somente as conexões intercontinentais e entre grandes centros populacionais, mas também a inter- e intraconexão de centrais de dados e as redes metropolitanas, não sendo raro chegarem diretamente na casa do consumidor final.

Entretanto, a sua estabelecida onipresença em tantos cenários cruciais para a infraestrutura de telecomunicações tem trazido desafios significativos para o desenvolvimento de novos sistemas ópticos de telecomunicações, especialmente ao considerar a crescente demanda pelo tráfego de um volume exponencialmente crescente de dados. De fato, os atuais sistemas ópticos de comunicação operam muito próximo do seu limite teórico e têm demandado o desenvolvimento de soluções cada vez mais complexas para prover os ganhos requeridos pelo mercado. Em tal cenário, soluções advindas de técnicas baseadas em Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina têm sido progressivamente exploradas no ambiente acadêmico e em aplicações industriais, sendo responsáveis por ganhos tangíveis em termos de desempenho e custos de instalação (CAPEX) e operação (OPEX). Neste sentido,

algoritmos de inteligência artificial vêm sendo aplicados, destacando-se o uso de aprendizado de máquinas (ML - *Machine Learning*), o qual permite que um sistema computacional aprenda a emular processos físicos ou execute determinadas operações com base em melhoras progressivas de seu desempenho mensuradas em função de um objetivo originalmente determinado. Dessa forma, a aprendizagem de máquina possibilita que problemas complexos sejam resolvidos com tempo reduzido de processamento e mínima intervenção humana. Os algoritmos desenvolvidos para tal fim podem ser divididos em três principais categorias: supervisionados, onde o algoritmo é treinado conhecendo os dados de entrada e de saída (dados rotulados); não supervisionados, onde o algoritmo é treinado com os dados de entrada e precisa aprender as saídas (dados sem rótulos); e o aprendizado por reforço, onde o algoritmo aprende com base nas experiências anteriores (penalidade ou recompensa).



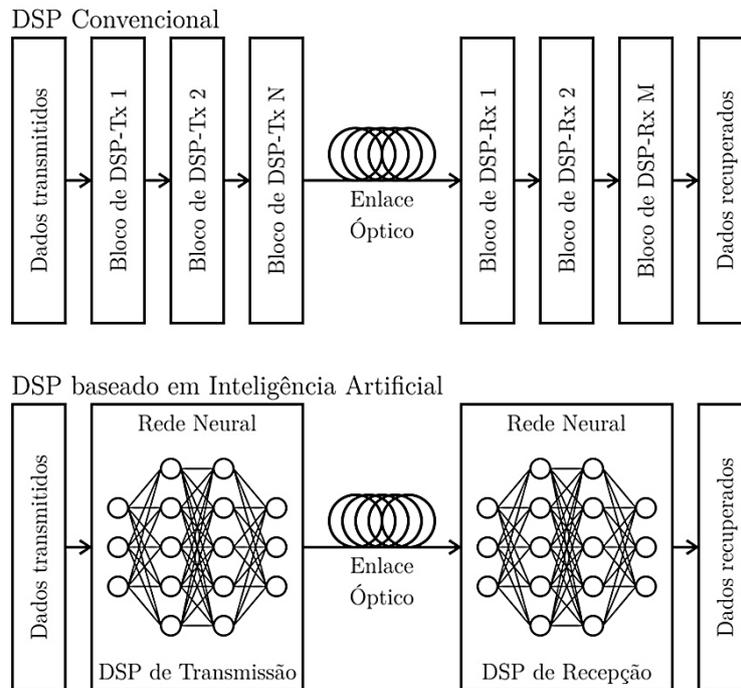
**Figura 1** - As três principais categorias de aprendizagem de máquina e algumas de suas possíveis aplicações na área de comunicações ópticas.

Mais especificamente, uma grande parcela das aplicações explora o uso de redes neurais artificiais como uma ferramenta para modelar, de forma simplificada, os complexos modelos físicos de operação de sistemas ópticos, seja no nível dos processos físicos que regem o funcionamento de dispositivos ópticos ou no nível do controle e



gerência de redes ópticas dinâmicas e reconfiguráveis. Dessa forma, considerando que os cuidados necessários tenham sido tomados para a obtenção dos bancos de dados e treinamento das redes, pode-se inferir o comportamento de determinado sistema com alta precisão e exatidão e com menor custo computacional, não sendo raro também empregar técnicas de otimização bio-inspiradas aliadas a tais redes neurais.

Na perspectiva de uma rede óptica reconfigurável, a aplicação de inteligência artificial tem sido explorada como uma ferramenta para maximizar a eficiência de tais sistemas, permitindo que as camadas de gerência e de controle decidam com assertividade e velocidade a melhor configuração dos elementos de rede e caminho ótimo para a transmissão de cada canal em termos de carga da rede, nível de degradação dos canais transmitidos, consumo energético, capacidade agregada, estabilidade e resiliência. Adicionalmente, redes neurais podem ser empregadas para monitorar elementos críticos, sendo capazes de antever falhas em dispositivos ou eventos de pico de demanda, agindo de acordo com protocolos para atuar de modo preventivo a fim de manter a boa operação da rede e reduzir os riscos de seus clientes. Analisando a própria camada física de uma rede óptica e os elementos que a compõem, redes neurais artificiais são normalmente utilizadas para modelar os processos físicos, comumente de natureza não linear, que regem a propagação e manipulação de sinais ópticos. Um interessante exemplo de tais aplicações se dá no projeto e na otimização de amplificadores ópticos, elementos responsáveis por aumentar a potência dos canais transmitidos por determinado enlace, empregando fenômenos físicos de alta complexidade para transferir energia entre sinais ópticos. Entretanto, o seu projeto não deve considerar somente tais processos físicos que ocorrem no domínio óptico, mas também o seu impacto no desempenho da rede como um todo, no domínio das camadas de gerência e controle, uma vez que terão impacto sistêmico em todo o conjunto de canais transmitido por determinado enlace.

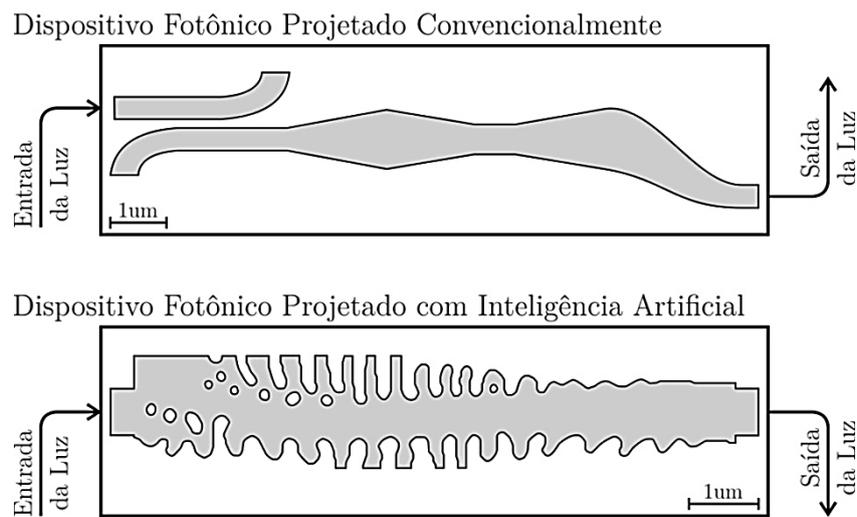


**Figura 2** - Os diversos blocos que compõem um DSP convencional, tanto do lado transmissor (Tx) quanto do receptor (Rx), podem ser substituídos por redes neurais, com potencial ganho de desempenho ao possibilitar a compensação de efeitos degradantes que nem sempre podem ser compensados usando os blocos convencionais.

Portanto, não é raro o uso de inteligência artificial visando otimizar o projeto de tais elementos, possibilitando explorar topologias de amplificação mais complexas sob a perspectiva da maximização do desempenho geral da rede e não somente de cada elemento individualmente. Outra aplicação interessante se dá pela possibilidade de empregar redes neurais artificiais como alternativa às cadeias de processamento digital de sinais, caracterizadas por serem compostas por complexos blocos de filtragem e equalização digital, empregados para codificar e recuperar as informações transmitidas na própria portadora óptica. A substituição dos códigos convencionais por redes neurais, especialmente treinadas para tal fim, permite que o transmissor e receptor se adaptem à própria resposta não-linear do enlace óptico em certa condição de operação, obtendo ganhos na capacidade de transmissão e adaptando-se dinamicamente para a compensação de variações do sistema.

Por fim, também é relevante destacar o uso de inteligência artificial no projeto de dispositivos em fotônica integrada, os quais são responsáveis por revoluções tecnológicas nas telecomunicações e também em aplicações nos campos de sensoriamento, computação e criptografia quântica. A operação de tais elementos é marcada por intrincadas interações entre os sinais eletromagnéticos e as estruturas

projetadas em dimensões nanométricas, de forma que o uso de inteligência artificial tem possibilitado ganhos sensíveis em termos de desempenho e velocidade de projeto e otimização. Em específico, o uso de algoritmos de otimização bio-inspirados permite que uma pluralidade de fatores sejam considerados conjuntamente no projeto, encontrando, em tempo reduzido, as combinações que permitem obter o desempenho objetivado. Mais ainda, o uso de redes neurais possibilita que estruturas não intuitivas, empregando metamateriais, sejam projetadas obtendo-se resultados até então inviáveis a partir de técnicas de projeto convencionais.



**Figura 3** - O uso de aprendizagem de máquina possibilita o projeto de dispositivos integrados com formas não convencionais e não intuitivas, trazendo potenciais ganho de desempenho e redução de dimensões.

Os exemplos aqui apresentados são um pequeno compilado da revolução possibilitada pelo uso de inteligência artificial em mais um campo do conhecimento, comprovadamente trazendo ganhos não só em termos de desempenho, mas também de velocidade, flexibilidade e confiabilidade nas atuais redes de telecomunicações, baseadas em comunicações ópticas. Conforme tais sistemas continuam crescendo em importância e complexidade, impulsionados pela Internet das Coisas, tecnologias imersivas e pelas redes 5G e além, será crucial que os projetistas e operadores de sistemas ópticos contem com técnicas de inteligência artificial em seu ferramental, inclusive demandando um profundo intercâmbio de conhecimento entre especialistas de ambas as áreas.