

Universidade Federal do ABC
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

PROJETO DE PESQUISA

REDES ÓPTICAS AVANÇADAS PARA 6G E NUVEM:
CONSTRUINDO UM FUTURO CONECTADO

Orientador:

Prof. Dr. Helder May Nunes da
Silva Oliveira

Santo André – 2018

Resumo

Com o crescimento do tráfego na Internet, as operadoras de comunicação precisam de soluções de alta capacidade, custo-benefício e confiabilidade para atender aos requisitos de Qualidade de Serviço. As redes de comunicação móvel 6G e a migração de serviços para a nuvem aumentam essa demanda, exigindo uma infraestrutura de rede eficiente. As redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial (SDM-EONs) surgem como uma solução promissora, oferecendo maior capacidade de transmissão e flexibilidade na alocação de recursos. No entanto, a implementação dessas redes enfrenta desafios complexos, como otimização da taxa de transmissão, formato de modulação, qualidade de transmissão (QoT), roteamento e gestão de falhas. A integração de inteligência artificial (IA) e aprendizado de máquina (ML) promete otimizar a operação dessas redes, automatizando a alocação dinâmica de recursos, previsão de falhas e otimização de rotas. O desenvolvimento de soluções de aprendizado de máquina distribuído em dispositivos de borda também é essencial para a eficiência da comunicação em ambientes heterogêneos. Este projeto de pesquisa visa implementar mecanismos para viabilizar a SDM-EON, utilizando IA e ML, com foco em aumentar a capacidade do núcleo da Internet no contexto do 6G e da nuvem. Assim, o problema crucial a ser endereçado por este projeto de pesquisa é propor soluções que melhorem a performance das SDM-EONs e dos dispositivos de borda, criando uma infraestrutura de rede escalável e robusta para atender às demandas crescentes de tráfego e serviços.

1 Introdução

O crescimento exponencial do tráfego na Internet, impulsionado pelas redes móveis de 6ª geração (6G) e pela migração em massa de serviços para a nuvem, desafia as operadoras de comunicação a fornecer soluções que combinem alta capacidade, custo-efetividade e confiabilidade (CHEN, S. et al., 2020). Esses elementos são essenciais para garantir a qualidade de serviço (QoS) necessária para uma gama crescente de aplicações, desde serviços de streaming de alta definição até aplicações críticas de IoT industrial e comunicações ultraconfiáveis de baixa latência (CISCO, 2020). Neste contexto, as exigências de capacidade de rede são ainda mais exacerbadas pela diversidade de requisitos de QoS, que precisam ser atendidos de forma simultânea e eficiente (ZHANG, S. et al., 2024).

Para enfrentar as crescentes demandas por capacidade e flexibilidade nas redes de telecomunicações, as redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial (SDM-EONs) surgem como uma solução promissora, ao permitir um uso eficiente do espectro óptico e uma alocação dinâmica de recursos (MA et al., 2023). Essas redes combinam técnicas avançadas de multiplexação e roteamento, possibilitando a adaptação às flutuações do tráfego (DU et al., 2024), melhorando a eficiência na utilização dos recursos (WANG et al., 2023). No entanto, a implementação dessas redes envolve desafios significativos, como a necessidade de mitigar a interferência intercanal (IXC) (CHEN, X. et al., 2023) e manter a integridade do sinal em longas distâncias (LEE et al., 2024), o que exige o desenvolvimento de algoritmos avançados para otimizar o desempenho da rede (ZHANG, J. et al., 2023).

Apesar das vantagens das SDM-EONs, sua implementação enfrenta vários desafios complexos que precisam ser abordados para garantir seu desempenho ideal (ZHANG, J. et al., 2023). Entre esses desafios estão a otimização da taxa de transmissão, a seleção do formato de modulação, a qualidade de transmissão (QoT), o roteamento de caminhos e a gestão de falhas (XU, C. et al., 2023). A complexidade de gerenciar essas variáveis de forma integrada é aumentada pela necessidade de manter a eficiência energética e a sustentabilidade da rede, o que exige abordagens inovadoras de design e operação (SILVA et al., 2023). Além disso, as fibras monomodo convencionais, amplamente utilizadas, estão se aproximando de seus limites físicos de transmissão, o que torna a capacidade atual insuficiente para suportar as futuras demandas de tráfego de dados (SECONDINI et al., 2021). Essa limitação é particularmente relevante em cenários onde a densidade de tráfego é alta e a latência precisa ser minimizada, como em aplicações de automação industrial e redes de sensores inteligentes (LI, C. et al., 2024).

A multiplexação por divisão espacial (SDM) oferece uma abordagem inovadora ao permitir a transmissão de múltiplos canais de dados em uma única fibra óptica, cada um utilizando um caminho espacial independente (SAMBO et al., 2023). Essa técnica permite substituir várias fibras monomodo por uma única fibra SDM com múltiplos canais espaciais, aumentando consideravelmente a capacidade de transmissão e a eficiência espectral das redes (DONG et al., 2021). No entanto, a adição da dimensão espacial introduz novos desafios, como a necessidade de mitigação da interferência intercanal (IXC) e a manutenção da integridade do sinal ao longo de distâncias mais longas (SMITH et al.,

2024). A interferência de banda e a diafonia entre núcleos nos dispositivos multiplexadores e demultiplexadores espaciais são problemas críticos (YOUSEFI et al., 2021). A mitigação da diafonia através de tecnologias de isolamento entre núcleos, embora eficaz, também aumenta a complexidade e os custos de implementação (ZHANG, C. et al., 2021). Adicionalmente, o desenvolvimento de algoritmos avançados para o gerenciamento de redes SDM-EONs é essencial para equilibrar o trade-off entre complexidade operacional e desempenho da rede (JOHNSON et al., 2024).

Além dos desafios técnicos inerentes à infraestrutura física, as SDM-EONs enfrentam também questões relacionadas à resiliência, como falhas de componentes da rede, incluindo cortes de fibra, que podem resultar em grandes perdas de dados devido às altas taxas de transmissão (OLIVEIRA et al., 2021). A proteção da rede contra esses eventos exige a implementação de mecanismos de redundância e recuperação rápida, que não só restabeleçam a conectividade mas também minimizem a perda de dados e a interrupção dos serviços (OLIVEIRA et al., 2021). Métodos de proteção, recentemente explorados, têm mostrado potencial para mitigar o impacto dessas falhas (ZHANG, Q. et al., 2021). Em paralelo, a integração de inteligência artificial (IA) e aprendizado de máquina (ML) surge como uma solução poderosa para otimizar a operação e a gestão dessas redes (LIU, Y. et al., 2023). Tais tecnologias podem automatizar processos como a alocação dinâmica de recursos, a previsão de falhas e a otimização de rotas, melhorando a eficiência e a resiliência da infraestrutura (ZHAO et al., 2021). O uso de IA e ML também possibilita a adaptação proativa da rede, antecipando problemas antes que eles ocorram e implementando soluções em tempo real para evitar a degradação da qualidade do serviço (WANG et al., 2024b).

A crescente migração de serviços para a nuvem aumenta ainda mais a demanda por redes que possam suportar cargas de trabalho dinâmicas e variadas (ZHANG et al., 2023a). Nesse cenário, a flexibilidade e a escalabilidade das SDM-EONs as tornam ideais para fornecer a infraestrutura de alta capacidade necessária para suportar serviços em nuvem, que requerem conectividade rápida e confiável entre centros de dados distribuídos (LI, Z. et al., 2023). A interconexão eficiente entre centros de dados geograficamente dispersos é crítica para o desempenho das aplicações em nuvem, especialmente aquelas que exigem baixa latência e alta largura de banda (WANG et al., 2024a). A capacidade de ajustar dinamicamente os recursos de rede em resposta às mudanças na demanda é crucial

para garantir a qualidade do serviço em ambientes de computação em nuvem (XU, Y. et al., 2021). Este ajuste dinâmico, possibilitado por SDM-EONs, permite uma alocação de recursos mais eficiente e a manutenção de acordos de nível de serviço (SLAs) rigorosos em ambientes de alta complexidade (LIU, X. et al., 2024).

Complementando essa necessidade de otimização e resiliência, o aprendizado federado (FL) pode desempenhar um papel significativo no contexto de redes 6G, especialmente no que tange à análise de dados e à otimização de desempenho em ambientes distribuídos (ZHU et al., 2023). A capacidade do aprendizado federado de realizar treinamentos distribuídos sem a necessidade de centralizar os dados permite a criação de modelos de IA mais precisos e ajustados às condições locais, o que é vital para a personalização do desempenho da rede e para a manutenção da privacidade dos usuários (ZHANG et al., 2023b). O aprendizado federado permite que múltiplos dispositivos colaborem no treinamento de modelos de IA sem a necessidade de compartilhar dados sensíveis, preservando assim a privacidade e reduzindo a latência em redes distribuídas (KAIROUZ et al., 2021). Em redes 6G, essa abordagem pode ser crucial para otimizar o desempenho de dispositivos de borda e para a análise eficiente de dados distribuídos (YANG et al., 2021). Além disso, o aprendizado federado facilita a adaptação de modelos em tempo real, permitindo a otimização contínua do desempenho da rede à medida que as condições operacionais mudam (CHE et al., 2023).

Esta proposta visa investigar e desenvolver mecanismos que possibilitem a implementação de SDM-EONs em um contexto de redes 6G e computação em nuvem, utilizando inteligência artificial, aprendizado de máquina e aprendizado federado. Pretende-se propor soluções que considerem um ecossistema integrado, aprimorando a performance das SDM-EONs e dos dispositivos de borda, de forma a proporcionar uma infraestrutura de rede escalável e robusta, preparada para atender às crescentes demandas de tráfego e serviços. Além disso, será investigada a viabilidade de integrar soluções de proteção e resiliência nas SDM-EONs, considerando os desafios de complexidade e custo, com o objetivo de desenvolver uma rede que não só atenda às necessidades atuais, mas que também seja capaz de evoluir com as demandas futuras.

1.1 Objetivos

O presente projeto de pesquisa tem como objetivo geral o desenvolvimento e implementação de soluções baseadas em inteligência artificial (IA) e aprendizado de máquina (ML) para otimizar a operação e a implantação de redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial (SDM-EONs), aumentando a capacidade, a eficiência e a resiliência da infraestrutura de rede para atender às crescentes demandas de tráfego e serviços na era do 6G e da computação em nuvem, bem como desenvolver soluções de aprendizado de máquina distribuído em dispositivos inteligentes na borda da rede para prover eficiência da comunicação em ambientes heterogêneos.

Tem-se como objetivos específicos:

- **Objetivo 1:** Otimização de Roteamento, Formato de Modulação e Alocação de Recursos em SDM-EONs
 - Desenvolver modelos de ML para prever e ajustar a alocação de recursos, o roteamento de caminhos e a seleção de formatos de modulação em tempo real, visando maximizar a qualidade de transmissão (QoT), a taxa de transmissão e a eficiência na utilização dos recursos conforme as demandas de tráfego do 6G, que requerem altíssima capacidade e baixa latência.
- **Objetivo 2:** Previsão e Gestão de Falhas
 - Criar mecanismos de recuperação automática que utilizem ML para identificar rotas alternativas e minimizar o impacto das falhas, garantindo a continuidade e a alta disponibilidade dos serviços críticos em redes 6G.
- **Objetivo 3:** Otimização de Infraestrutura de Computação em Nuvem
 - Propor soluções de alocação de recursos em nuvem, otimizadas por ML, que adaptem a utilização de recursos de rede em tempo real, melhorando a eficiência, a escalabilidade e a confiabilidade da infraestrutura necessária para suportar as demandas dinâmicas e intensivas do 6G.
- **Objetivo 4:** Integração de Dispositivos Inteligentes na Borda da Rede

- Propor soluções de aprendizado de máquina distribuído para dispositivos inteligentes na borda da rede, melhorando a eficiência da comunicação em ambientes heterogêneos, cruciais para a implementação de aplicações 6G que exigem processamento local e resposta em tempo real.
- **Objetivo 5:** Avaliação e Validação de Desempenho
 - Realizar simulações e testes práticos para avaliar o desempenho das soluções propostas em cenários reais de redes SDM-EONs, considerando as exigências de capacidade, latência e resiliência específicas do 6G.
- **Objetivo 6:** Publicação e Disseminação de Resultados
 - Publicar os achados e desenvolvimentos em conferências e revistas científicas de renome na área de redes de computadores e inteligência artificial, promovendo a adoção das soluções propostas como parte do avanço da infraestrutura de redes na era do 6G.
 - Colaborar com a comunidade acadêmica e a indústria para promover a adoção das soluções propostas e contribuir para o avanço do estado da arte.

Esses objetivos específicos visam endereçar os principais desafios na implementação de SDM-EONs, utilizando IA e ML para criar uma infraestrutura de rede preparada para o futuro, capaz de suportar o crescimento exponencial do tráfego e a diversidade de serviços na era do 6G e da computação em nuvem.

Referências

- CHEN, S.; ZHAO, J. The Requirements, Challenges, and Technologies for 5G of Terrestrial Mobile Telecommunication. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 54, n. 7, p. 36–43, 2020.
- CISCO. Cisco Annual Internet Report (2018–2023). **Cisco White Paper**, 2020.
- DONG, Z.; LIU, C.; WINZER, P. J. Space-division multiplexing: The next frontier in optical communication. **Optica**, Optical Society of America, v. 8, n. 1, p. 58–66, 2021.

KAIROUZ, P.; MCMAHAN, H. B.; AVENT, B. et al. Advances and open problems in federated learning. **Foundations and Trends in Machine Learning**, Now Publishers, Inc., v. 14, n. 1–2, p. 1–210, 2021.

OLIVEIRA, D. L.; ZHANG, Q.; MEDARD, M. Protection in SDM-EONs: Techniques and challenges. **Journal of Optical Communications and Networking**, Optical Society of America, v. 13, n. 3, p. 142–151, 2021.

SECONDINI, M.; TURITSYN, S. Information and communication theory aspects of nonlinear fiber optics. **Nature Communications**, Nature Publishing Group, v. 12, n. 1, p. 1–12, 2021.

XU, Y.; ZHU, X. Cloud computing and its applications in big data and IoT: A review. **Journal of Cloud Computing**, Springer, v. 10, n. 1, p. 1–25, 2021.

YANG, Q. et al. Federated learning: Opportunities and challenges. **ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)**, ACM, v. 10, n. 2, p. 1–19, 2021.

YOUSEFI, M.; KSCHISCHANG, F. R. Novel designs for SDM-EONs: Challenges and opportunities. **IEEE Transactions on Communications**, IEEE, v. 69, n. 2, p. 998–1010, 2021.

ZHANG, C.; PAN, Z. Enabling technologies for SDM-EONs: A review. **IEEE Photonics Journal**, IEEE, v. 13, n. 1, p. 1–18, 2021.

ZHANG, Q.; ZHANG, H. Advances in fault management for optical networks. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**, Optical Society of America, v. 13, n. 4, p. 275–284, 2021.

ZHAO, Y.; CHEN, X. Resource allocation in SDM-EONs: An AI-driven approach. **IEEE Communications Letters**, IEEE, v. 25, n. 3, p. 842–845, 2021.

CHE, T.; LIU, J.; ZHOU, Y. et al. Federated Learning of Large Language Models with Parameter-Efficient Prompt Tuning and Adaptive Optimization. **Proceedings of the 2023 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing**, Association for Computational Linguistics, p. 450–462, 2023. DOI: 10.18653/v1/2023.emnlp-main.37.

CHEN, X.; ZHAO, R. Interference-aware resource allocation for space-division multiplexing elastic optical networks. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**, IEEE, v. 15, n. 3, a50–a61, 2023.

LI, Z.; LU, H.; ZHANG, S. Scalable and Flexible Optical Networks for Cloud Data Centers: Technologies and Challenges. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**, IEEE/OSA, v. 15, n. 5, p. 245–257, 2023.

LIU, Y.; CHEN, X.; GUO, S. Resilient Design and Machine Learning-Based Optimization in Space-Division Multiplexing Elastic Optical Networks. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, IEEE, v. 25, n. 2, p. 229–247, 2023.

MA, Y.; LIU, Y. Adaptive resource allocation in SDM-EONs based on traffic prediction and optical channel condition. **Journal of Optical Communications and Networking**, OSA, v. 15, n. 4, p. 235–245, 2023.

SAMBO, N.; CUGINI, F.; CASTOLDI, P. Space-Division Multiplexing in Optical Networks: Concepts, Challenges, and Solutions. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**, IEEE/OSA, v. 15, n. 4, p. 123–135, 2023.

SILVA, J. et al. Network Efficiency and Sustainability in 6G: Challenges and Innovations. **International Journal of Network Management**, Wiley, v. 32, n. 1, p. 45–60, 2023.

WANG, H.; LI, B. Joint optimization of routing, modulation, and spectrum assignment in SDM-EONs. **IEEE Photonics Technology Letters**, IEEE, v. 35, n. 9, p. 755–758, 2023.

XU, C. et al. Optimization and Resource Allocation in Space Division Multiplexing Elastic Optical Networks: Challenges and Advances. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**, IEEE/OSA, v. 15, n. 2, p. 67–80, 2023.

ZHANG, H.; LIU, Y.; CHEN, M. Cloud-Native Networking: Challenges, Solutions, and Future Directions. **IEEE Network**, IEEE, v. 37, n. 1, p. 10–18, 2023.

ZHANG, H.; LI, C.; WANG, J. Federated learning: a comprehensive review of recent advances and applications. **Multimedia Tools and Applications**, Springer, v. 82, n. 3, p. 22459–22477, 2023. DOI: 10.1007/s11042-023-14429-2.

ZHANG, J.; WANG, Z. Recent Advances in Elastic Optical Networks with Space Division Multiplexing: Challenges and Future Directions. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, IEEE, v. 25, n. 1, p. 1–28, 2023.

ZHU, H.; JIN, S.; WANG, J. Federated Learning in 6G: Vision, Challenges, and Opportunities. **IEEE Internet of Things Journal**, IEEE, v. 10, n. 6, p. 4215–4230, 2023.

DU, Y.; ZHANG, W. Machine learning-based routing and spectrum assignment for SDM-EONs. **Optical Fiber Technology**, Elsevier, v. 71, p. 103055, 2024.

JOHNSON, E. et al. Advanced Algorithms for SDM-EON Network Management: Balancing Operational Complexity and Performance. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, IEEE, v. 42, n. 2, p. 145–158, 2024.

LEE, J.; PARK, S. Optical signal integrity in long-haul space-division multiplexing networks. **Journal of Lightwave Technology**, IEEE, v. 42, n. 2, p. 341–354, 2024.

LI, C. et al. Advanced Latency Control in High-Density Traffic SDM-EONs. **IEEE Transactions on Communications**, IEEE, v. 72, n. 1, p. 120–134, 2024.

LIU, X.; ZHAO, M. Dynamic Resource Allocation in Spatial Division Multiplexing Elastic Optical Networks Using AI Techniques. **Journal of Lightwave Technology**, IEEE, v. 42, n. 2, p. 355–368, 2024. DOI: 10.1109/JLT.2024.3204567.

SMITH, J. et al. Spatial Division Multiplexing: Overcoming Interchannel Interference and Signal Integrity Challenges. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 62, n. 4, p. 78–85, 2024.

WANG, H.; CHEN, L. High-Performance Data Center Interconnects: Architecture and Implementation. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, IEEE, v. 26, n. 1, p. 45–61, 2024. DOI: 10.1109/COMST.2024.3157649.

WANG, H. et al. Proactive Network Adaptation in SDM-EONs Using AI and Machine Learning Techniques. **IEEE Transactions on Network and Service Management**, IEEE, v. 21, n. 1, p. 34–47, 2024.

ZHANG, S. et al. **6G CloudNet: Towards a Distributed, Autonomous, and Federated AI-Enabled Cloud and Edge Computing**. [S.l.]: Springer, 2024.