

f-Sim EON: Avaliação de Desempenho em Redes Ópticas Elásticas Sob Falhas em Cascata

Eonassis O. Santos¹, Carlos S. G. Richa², Alex S. Santos¹, Juliana de Santi³,
Antonio A. A. Rocha², Gustavo B. Figueiredo¹

¹Instituto de Computação (IC) – Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Salvador – BA – Brazil

{eonassissantos, santos.alex, gustavobf}@ufba.br

²Instituto de Computação (IC) – Universidade Federal Fluminense(UFF)
Rio de Janeiro – RJ – Brazil

arocha@ic.uff.br, salvador_richa@id.uff.br

³Departamento Academico de Informatica (DAINF)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná(UTFPR) Curitiba – PR – Brazil

jsanti@utfpr.edu.br

Abstract. *The article introduces the f-Sim EON simulator, developed to investigate the impacts of cascading failures in Elastic Optical Networks (EON). Implemented in Python 3 using the SimPy library, the simulator allows modeling various failure scenarios and evaluating risk mitigation strategies. Composed of modules, f-Sim EON offers a flexible platform for analysis and optimization of EONs in dynamic environments, promoting advancements in understanding and resilience of EONs.*

Resumo. *O artigo apresenta o simulador f-Sim EON, desenvolvido para investigar os impactos das falhas em cascata em Redes Ópticas Elásticas (EON). O simulador, implementado em Python 3 com a biblioteca SimPy, permite a modelagem de diversos cenários de falhas e avaliação de estratégias de mitigação de riscos. Composto por módulos, o f-Sim EON oferece uma plataforma flexível para análise e otimização das redes EON em ambientes dinâmicos, promovendo avanços na compreensão e resiliência das redes EON.*

1. Introdução

As Redes Ópticas Elásticas (EON) possuem flexibilidade para ajustar dinamicamente a largura de banda e outras características das conexões, otimizando recursos e respondendo de forma ágil às variações de tráfego [Gerstel et al. 2012].

Redes ópticas enfrentam diversas ameaças, incluindo eventos catastróficos que podem causar falhas em múltiplos componentes simultaneamente [Rak et al. 2021], seja por desastres naturais como inundações e terremotos, ou por atividades humanas como ataques de *Eletromagnetic Pulse* (EMP) e *Distributed Denial-of-Service* (DDoS).

Com o aumento desses incidentes, a resiliência a desastres se torna crucial para garantir a continuidade dos serviços de rede, especialmente diante de desastres de grande

escala [Rak and Hutchison 2020]. Os impactos desses desastres variam desde falhas em enlaces de rede até escassez de recursos, resultando em interrupção de serviços essenciais e prejuízos financeiros [Zou et al. 2022].

A avaliação de redes EON enfrenta desafios na compreensão de como diferentes cenários de falhas afetam o desempenho geral da rede, como exemplo Falhas em cascata, onde uma falha única pode desencadear uma série de eventos subsequentes, representando uma ameaça significativa para redes EON. Dessa forma esse trabalho apresenta o f-Sim EON, um simulador personalizável em Python 3 que oferece uma plataforma para investigar esses cenários complexos e desenvolver estratégias de mitigação de risco, permitindo aos pesquisadores explorar soluções resilientes.

1.1. Trabalhos Relacionados

O uso de simuladores para estudar Redes Ópticas é um consenso tanto na indústria quanto na academia. No entanto, simuladores disponíveis atualmente são projetados para situações específicas e não atendem plenamente às demandas emergentes das redes EON diante de desastres em cascata associados a cenários de simulação em redes EON.

O simulador descrito em [Glabowski et al. 2020] utiliza arquitetura EON baseada em malha de comutação CLOS¹ de 3 estágios, com foco na camada física,

Por sua vez, o Complex Elastic Optical Networks Simulator (CEONS) [Aibin and Blazejewski 2015] concentra-se em resolver problemas de roteamento e atribuição de espectro (RSA), RSA com modulação (RMSA), e posicionamento de regeneradores.

Algumas universidades brasileiras têm desenvolvido Simuladores EON, como o FlexGridSim da Unicamp (EON e SDM)[Oliveira and Fonseca 2014]², o SimEON da UFPE[Cavalcante et al. 2017]³ (focado em Camada Física), o ONS da UnB (WDM, EON e SDM)[Costa et al. 2016]⁴, o EONPlacement da UFRJ (Sem artigo publicado)⁵ (focado em regeneradores 3R) e o SONDA da UFCG (SDM)[Guerra-Júnior et al. 2021]⁶.

O simulador para redes EON proposto por [Santos et al. 2022] do grupo da UFBA⁷ considera cenários de falha e degradação de serviço. Entretanto nenhum dos simuladores citados simula falhas em cascata. Este trabalho apresenta o simulador f-Sim EON, uma extensão do simulador [Santos et al. 2022] que considera cenários de falhas em cascata e roteamento multi-caminho.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: A Seção 2 apresenta a Motivação. A Seção 3 descreve conceitos para a compreensão do problema. A Seção 4 descreve o problema tratado pela ferramenta, e a arquitetura do Simulador f-Sim EON, suas configurações e funcionalidades, assim como onde pode ser encontrado o código fonte, a documentação gerada, a demonstração do simulador e os resultados gerados. Na Seção 5, concluímos este trabalho.

¹CLOS é um tipo de rede de comutação de circuitos multiestágio

²<https://www.lrc.ic.unicamp.br/flexgridsim/>

³<https://github.com/suehtamacv/simeon>

⁴<https://ons-simulator.com/download/>

⁵<https://github.com/EON-Placement/Simulator>

⁶<https://github.com/GuerraJr/SONDA-SDM>

⁷<https://ionlab.ufba.br/>

2. Motivação desse trabalho

A avaliação do desempenho das EON, especialmente em cenários de falhas, continua sendo um desafio significativo. Com a complexidade inerente das redes EON e os impactos potencialmente devastadores de falhas em cascata, é necessário o desenvolvimento de ferramentas de simulação robustas para modelar e analisar o comportamento de redes EON em condições adversas.

Além disso, é importante considerar a importância científica dos simuladores no desenvolvimento, implantação, operação e recuperação das redes. No âmbito acadêmico, a utilização de código aberto possibilita a interação entre pesquisadores e desenvolvedores, promovendo melhorias. Também é relevante destacar o aspecto educacional da disseminação do conhecimento proporcionada por essas ferramentas.

3. Revisão Teórica

3.1. Falhas em Cascata

As redes EON são projetadas para serem resilientes e confiáveis, mas ainda estão suscetíveis a uma variedade de falhas e interrupções. Um tipo particularmente preocupante de falha é a falha em cascata, onde um incidente desencadeia uma série de eventos subsequentes que podem comprometer a integridade e o desempenho da rede [Ju et al. 2022] [Ramalho et al. 2023].

Falhas em cascata ocorrem quando elementos da rede próximos ao epicentro de um desastre são impactados. Um exemplo é apresentado na Figura 1, representando o epicentro de um desastre com o potencial de propagação, afetando as regiões circundantes. A probabilidade de um elemento ser afetado é determinada pela sua proximidade, tanto fisicamente quanto em termos de interdependência, conforme ilustrado pelas porcentagens mencionadas na Figura 1 (por exemplo, 73%, 15%, e 5%).

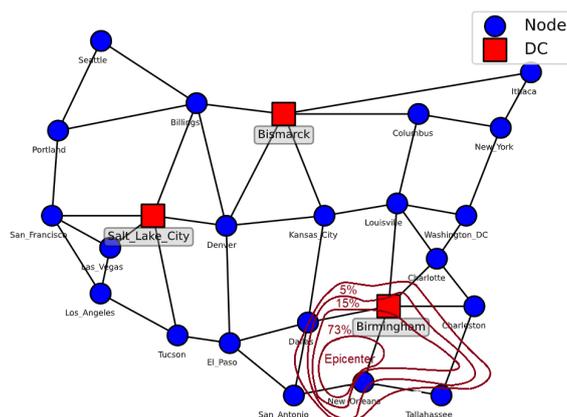


Figura 1. Exemplo de um desastre com potenciais falhas em cascata na topologia USA [Ramalho et al. 2023]

3.2. Multi-caminhos de luz

O conceito de multi-caminhos de luz permite direcionar diferentes fluxos de tráfego óptico através de caminhos ópticos distintos na mesma infraestrutura de rede, aprovei-

tando a natureza elástica da rede para alocar dinamicamente recursos de largura de banda [Gerstel et al. 2012].

Na Figura 2, é apresentado um cenário de rede considerando a origem (A) e o destino (B). A alocação começa pela aresta A-C. O segmento subsequente, C-B, sendo o mais próximo de B, tem uma capacidade de 3, preenchendo 3 caminhos de luz no trajeto A-C-B. A saída alternativa de A, pela aresta A-D, disponibiliza 3 caminhos de luz. Contudo, o caminho D-B através de D, apesar de ter 6 caminhos de luz mais próximos de B, é restrito pelos 3 caminhos de luz do caminho A-D, limitando sua capacidade a 3 caminhos de luz. O caminho A-C-D-B preenche os três últimos caminhos de luz restantes. Com essa distribuição, todos os caminhos de luz entre A e B são utilizados, alcançando o máximo de 9 caminhos de luz entre A e B, e caso seja solicitado um tráfego para 9 caminhos de luz, o mesmo pode ser atendido graças a estas funcionalidades EON.

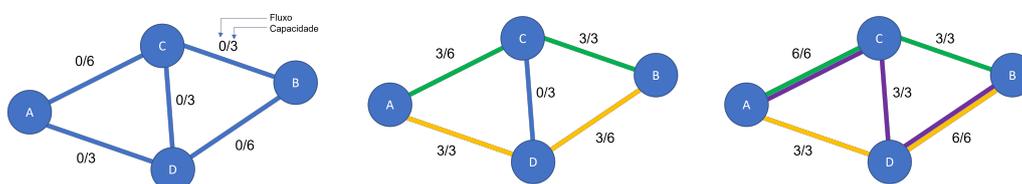


Figura 2. Multi-caminhos de luz.

4. Simulador de falhas

Este artigo apresenta um simulador desenvolvido com a biblioteca SimPy e Python para simular Redes Ópticas Elásticas (EON). O simulador modela aspectos das EONs, como alocação dinâmica de espectro, elasticidade das conexões e falhas em cascata. Ele também permite o tráfego passar por multi-caminhos, conforme especificado nas redes EON com a utilização de BVT's [Gerstel et al. 2012]. O simulador proposto representa uma contribuição para a pesquisa em comunicações ópticas, oferecendo uma ferramenta flexível para análise e otimização de redes EON em ambientes dinâmicos.

4.1. f-Sim EON

O simulador f-Sim EON, uma ferramenta de simulação orientada a eventos, é composto pelos seguintes módulos: configurações, topologias de rede, utilitários e simulação.

O módulo de configurações inclui todas as configurações necessárias para o funcionamento correto do simulador, como o número de requisições e as amostras de simulação, classes de tráfego e sua distribuição percentual nas requisições, cargas em Erlangs simuladas, bandas utilizadas nas requisições, quantidade de *slots* disponíveis em cada salto da rede, tamanho do *slot* em GHz, zonas de falha (áreas com enlaces/nós afetados), e o momento em que isso ocorrerá durante a simulação.

O módulo de topologia de redes é responsável por carregar a topologia escolhida no módulo de configurações. Atualmente, no simulador, temos as redes para pesquisa RNP (Rede Nacional de Pesquisa), e do IEEE, as redes EON (*European Optical Networks*), NFSNET e USA (*United States of America Network*).

O módulo utilitários possui métodos necessários para calcular métricas, desvio padrão da média das simulações, salvar os arquivos com resultados das simulações e gerar gráficos com esses dados.

O módulo de simulação é o maior e mais complexo, contendo um módulo para iniciar a simulação, gerar eventos de tráfego na rede com os dados presentes na configuração, números de repetição de cargas e bandas, bem como as classes de tráfego na sua respectiva proporção. Ele também é responsável por gerar falhas na rede determinadas no arquivo de configuração, definir a modulação utilizada com base na distância e, com isso, determinar quantos *slots* determinada banda consome ao passar por um caminho. Além disso, é responsável pelo re-roteamento da rede quando ocorrem falhas na mesma. A classe de re-roteamento é responsável por aplicar o algoritmo de re-roteamento baseado no algoritmo de fluxo máximo. Após uma falha na rede, o tráfego que passava por ali deve ser realocado por outro caminho, e ele aloca *slots* para outros caminhos até que a demanda da solicitação afetada se esgote.

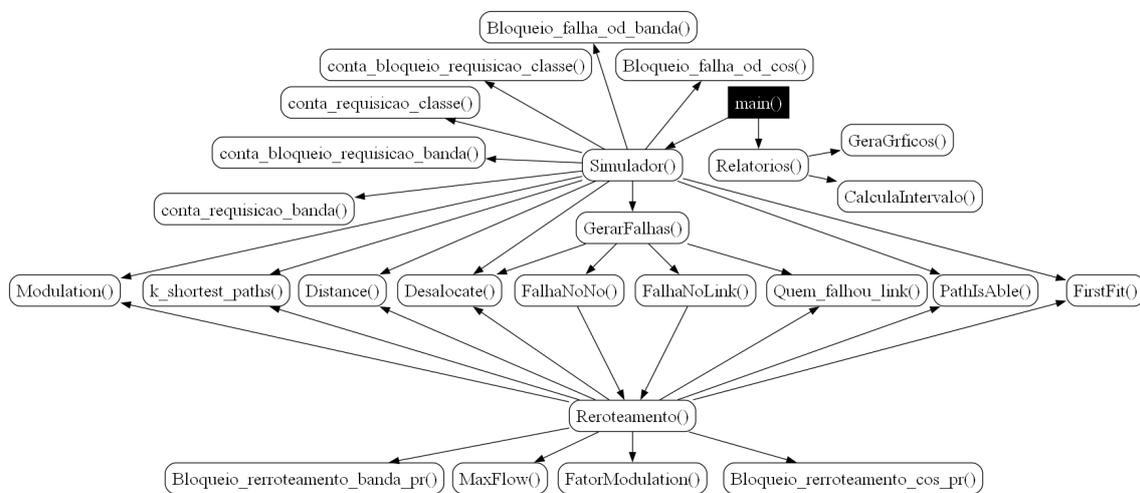


Figura 3. Diagrama do f-Sim EON e relação entre eles.

O simulador f-Sim foca na simulação de redes ópticas EON e na otimização de sua operação. Os algoritmos de otimização a serem executados na rede devem ser implementados no módulo de simulação. Durante a execução da simulação, esses algoritmos são invocados pela classe Simulador, que é acionada tanto pela classe principal da simulação quanto por solicitações em processamento que sofrem falhas, conforme gerenciado pela classe FalhaNoNó. A versão atual da ferramenta inclui os algoritmos *First-Fit* e *MaxFlow*, além de ser capaz de lidar com TVGs (Grafos Variantes no Tempo), proporcionando a capacidade de trabalhar com cenários de desastre em EON.

O diagrama da Figura 3 apresenta a estrutura e as relações entre os diferentes módulos e classes do simulador. Ele mostra a interconexão entre o módulo principal, representado pelo nó preto, e outros módulos, como Simulador, GerarFalhas e Relatórios. Também evidencia classes relacionadas à simulação, como *conta_requisicao_banda* e *conta_requisicao_classe*, assim como classes para tratamento de falhas, como *FalhaNoLink* e *FalhaNoNo*, que são acionadas pelo GerarFalhas.

A classe Rerroteamento é responsável pelo re-roteamento de tráfego em caso de falhas na rede. O MaxFlow é responsável pelo cálculo do fluxo máximo em um grafo. Essas classes estão interligadas, mostrando a complexidade e a integração do sistema de simulação.

O diagrama também destaca a geração de gráficos com os resultados da simulação,

representada pela classe GeraGráficos, e a classe CalculaIntervalo, responsável pelo cálculo de intervalos de confiança.

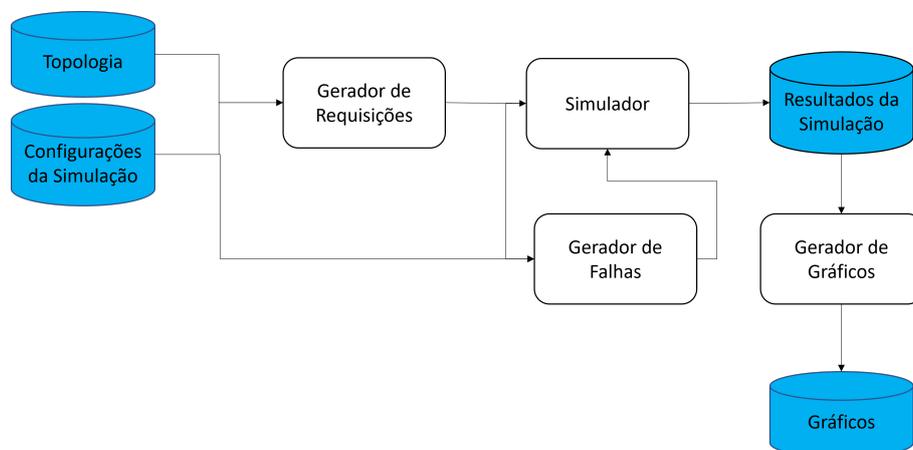


Figura 4. Fluxograma de execução do f-Sim EON.

A Figura 4 mostra os dados da topologia e as configurações da simulação como entrada para o simulador iniciar o gerador de requisições. Essas requisições são geradas aleatoriamente na rede através da distribuição de Poisson, com o uso de sementes em Python garantindo a replicabilidade dos resultados. O simulador é responsável por inserir as requisições e simular sua passagem pelo ambiente, além de acionar o gerador de falhas, que gera falhas na rede com base nas configurações predefinidas de falhas em nós e enlaces.

O código do simulador f-sim EON e sua documentação podem ser encontrados no github ⁸. Também foi disponibilizado um video tutorial de instalação e funcionamento ⁹.

4.1.1. Avaliação de desempenho

O experimento foi conduzido em uma máquina com processador Intel Core i5-7500T de 64 bits, 4 núcleos, cache de 8 MB, frequência de 2,7 GHz e 16 GB de RAM, Python 3.

As simulações são realizadas utilizando o método de replicações independentes para obter um nível de confiança de 95% (note-se que embora plotados nos gráficos, não são visíveis porque são pequenos para o tamanho da imagem). As demandas de largura de banda dessas requisições variam em igual proporção entre 10 Gbps, 20 Gbps, 40 Gbps, 80 Gbps, 160 Gbps, 200 Gbps e 400 Gbps.

Para simular falhas na rede, foram estabelecidos parâmetros como o tempo de início e intervalo entre os desastres, bem como a duração de cada desastre. Pontos de falha foram especificados nos enlaces e nós da topologia "USA"(Figura 1).

Foram realizadas dez execuções de simulação para cada ponto de curva, com 100.000 solicitações de serviço seguindo uma distribuição de Poisson. Os canais de luz tem uma largura de 12,5 GHz, e a largura de banda das solicitações são distribuídas através

⁸<https://github.com/Eonassis/EON-Simulator/>

⁹<https://youtu.be/oYBNFZAtFR0>

de Distribuição de Poisson, entre 10 a 400 GB/s. Configures usualmente utilizadas em estudos deste tipo.

A Figura 1 ilustra uma das dez zonas de desastre, com um epicentro, cascata e probabilidades associadas. Cada zona foi replicada duas vezes⁸. O tempo entre os desastres no epicentro segue uma distribuição uniforme, e os intervalos entre cascatas na mesma zona consecutivos são de 3.600 unidades de tempo. As conexões simuladas têm um tempo de permanência distribuído exponencialmente (média de 8,64 unidades de tempo), e a duração do desastre é distribuída exponencialmente (média de 4,32 unidades de tempo). As origens e os destinos das solicitações são distribuídas uniformemente entre todos os nós da rede. Para as cascata, três eventos são considerados com probabilidades de 73%, 15% e 5% [Ramalho et al. 2023].

4.1.2. Resultados da simulação

A Figura 5 exibe dois gráficos gerados após a execução do simulador, fornecendo métricas para a avaliação do desempenho do algoritmo. Entre essas métricas estão a Restaurabilidade = $\frac{\text{Req_Restauradas}}{\text{Req_Afetadas}}$ e Disponibilidade = $\frac{\text{Soma_Tempo_Ativo}}{\text{Soma_Holding_Time}}$.

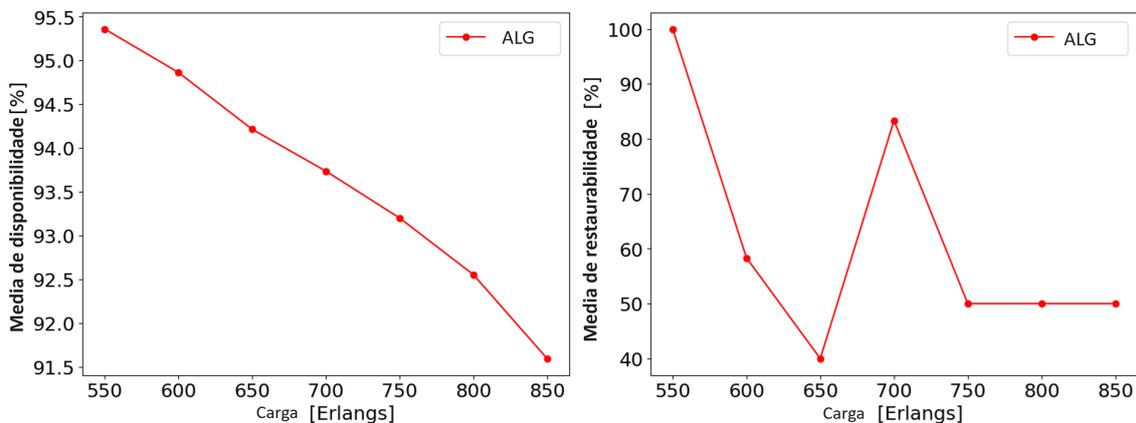


Figura 5. Gráficos da execução do f-Sim EON.

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este artigo apresentou o simulador de código aberto f-Sim EON, desenvolvido para lidar com falhas em cascata. O desenvolvimento e a documentação do simulador f-Sim EON foram disponibilizados em repositórios *online*, permitindo que outros pesquisadores reproduzam e expandam este trabalho. Espera-se que esse simulador contribua de forma significativa para os avanços futuros na área de redes ópticas elásticas, facilitando o desenvolvimento e teste de novas estratégias para garantir a sobrevivência destas redes. Futuramente serão adicionadas ao simulador funcionalidades tais como modelos de propagação dinâmica de cascatas.

⁸<https://github.com/GSRamalho/python-simple-anycast-wdm-simulator/tree/master/zones>

Referências

- Aibin, M. and Blazejewski, M. (2015). Complex elastic optical network simulator (ce-ons). In *2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pages 1–4.
- Cavalcante, M. A., Pereira, H. A., and Almeida, R. C. (2017). Simeon: an open-source elastic optical network simulator for academic and industrial purposes. *Photonic Network Communications*, 34:193–201.
- Costa, L. R., de Sousa, L. S., de Oliveira, F. R., da Silva, K. A., Júnior, P. J., and Drummond, A. C. (2016). Ons: Simulador de eventos discretos para redes ópticas wdm/eon. *Salao de Ferramentas do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores-SBRC*.
- Gerstel, O., Jinno, M., Lord, A., and Yoo, S. B. (2012). Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer? *IEEE Communications Magazine*, 50(2):s12–s20.
- Glabowski, M., Ivanov, H., Leitgeb, E., Sobieraj, M., and Stasiak, M. (2020). Simulation studies of elastic optical networks based on 3-stage clos switching fabric. *Optical Switching and Networking*, 36:100555.
- Guerra-Júnior, G. B., Sarmiento, E. B., Costa, M. G., and Pereira, H. A. (2021). Simulador de código livre aplicado em redes ópticas com multiplexação por divisão espacial. *XXXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT)*. *SBrT*, pages 1–5.
- Ju, M., Liu, Y., Zhou, F., and Xiao, S. (2022). Disaster-resilient and distance-adaptive services provisioning in elastic optical inter-data center networks. *Journal of Lightwave Technology*, 40(13):4064–4077.
- Oliveira, H. M. and Fonseca, N. L. d. (2014). Protection in elastic optical networks against up to two failures based fipp p-cycle. In *2014 Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems*, pages 369–375.
- Rak, J., Girão-Silva, R., Gomes, T., Ellinas, G., Kantarci, B., and Tornatore, M. (2021). Disaster resilience of optical networks: State of the art, challenges, and opportunities. *Optical Switching and Networking*, 42:100619.
- Rak, J. and Hutchison, D., editors (2020). *Guide to Disaster-Resilient Communication Networks*. Springer International Publishing.
- Ramalho, G. S., Fonseca, K. V. O., Pigatto, D. F., Natalino, C., Monti, P., Figueiredo, G. B., and de Santi, J. (2023). Cascading-failure-aware disaster recovery in optical cloud networks. In Gomes, T., López, D. L., Machuca, C. M., Valcarenghi, L., Jorge, L., and Melo, P., editors, *International Conference on Optical Network Design and Modeling, ONDM 2023, Coimbra, Portugal, May 8-11, 2023*, pages 1–3. IEEE.
- Santos, A. S., de Santi, J., Figueiredo, G. B., and Mukherjee, B. (2022). Application-aware service degradation in elastic optical networks. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 19(2):949–961.
- Zou, R., Hasegawa, H., Jinno, M., and Subramaniam, S. (2022). Drama+: Disaster management with mitigation awareness for translucent elastic optical networks. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 19(3):2587–2599.