

ONS: Simulador de Eventos Discretos para Redes Ópticas WDM / EON

Lucas R. Costa, Léia S. de Sousa, Felipe R. de Oliveira,
Kaio A. da Silva, Paulo J. S. Júnior e André C. Drummond

¹Departamento de Ciência da Computação – Universidade de Brasília (UnB),
70910-900, Brasília, Brasil

Abstract. *This paper presents the Optical Network Simulator - Wavelength Division Multiplexing / Elastic Optical Network (ONS-WDM/EON), a tool for optical networks evaluation. The ONS is a discrete event simulator which aims simulate traffic with arrivals and departures of connection requests from both WDM optical networks and the recent EON paradigm. ONS provides an environment for exploring the development of new Routing and Wavelength Assignment (RWA) protocols for WDM and new Routing, Modulation Level and Spectrum Allocation (RMLSA) algorithms for EON paradigm. We also present some examples of execution and results for simulator validation.*

Resumo. *Este artigo apresenta o Optical Network Simulator - Wavelength Division Multiplexing / Elastic Optical Network (ONS - WDM/EON), uma ferramenta para avaliação de redes ópticas. O ONS é um simulador de eventos discretos capaz de simular tráfego dinâmico com chegadas e partidas de requisições para ambos os paradigmas de redes ópticas WDM e o recente EON. O ONS proporciona um ambiente para a exploração do desenvolvimento de novos protocolos RWA (Routing and Wavelength Assignment) para WDM e algoritmos para RMLSA (Routing, Modulation Level and Spectrum Allocation) do paradigma EON. São apresentados exemplos de execução e resultados para validação do simulador.*

1. Introdução

A avaliação de desempenho dos sistemas de comunicação óptica é atualmente um desafio para os especialistas. Sua dinamicidade e complexidade não permite uma modelagem analítica precisa e a implementação de ambientes reais para medição muitas vezes é inviável por questões de custo e disponibilidade. A simulação é a alternativa disponível para atividades de teste, validação e avaliação de novos protocolos de controle para o ambiente de redes ópticas [Palmieri et al. 2009]. A simulação facilita a implementação de novos algoritmos fornecendo base para estudos e análises das características do plano de controle de maneira simples e escalável.

Várias ferramentas de simulação para redes ópticas de código livre podem ser encontradas na literatura. Dentre tais ferramentas, muitas derivam ou são módulos de simuladores de rede IP (*Internet Protocol*). Todavia, estas características trazem complexidades desnecessárias que podem ser abstraídas por simuladores exclusivos para rede óptica, permitindo uma maior velocidade de processamento por dispensar complexidades da camada IP. Por outro lado, também existem ferramentas proprietárias para tais serviços, entretanto suas características são limitadas e dificultam a manipulação por parte

do pesquisador [Palmieri et al. 2009]. Estas restrições reduzem ainda mais o número de simuladores desenvolvidos especificamente para redes ópticas de código aberto. O problema é agravado quando trata-se de uma ferramenta com foco no recente paradigma de redes ópticas elásticas (EON).

Este trabalho apresenta o ONS (*Optical Network Simulator - WDM / EON*)¹, um simulador de redes ópticas para os paradigmas WDM e EON. Inspirado no simulador WDMsim [Drummond], o ONS foi desenvolvido em Java e utiliza eventos discretos para simular requisições de tráfego de uma rede óptica WDM ou EON através de seus respectivos problemas de roteamento e alocação: RWA (*Routing and Wavelength Assignment*); e RMLSA (*Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation*)². As funcionalidades projetadas permitem uma implementação fácil e ágil de novos algoritmos (RWA/RSA/RMLSA), fornecendo satisfatoriamente as principais métricas de desempenho para o cenário de tráfego de rede dinâmico, mesmo quando grandes topologias de rede são empregadas na simulação.

2. Trabalhos relacionados

A seguir, algumas ferramentas de simulação em redes ópticas de código aberto são destacadas na literatura. Entretanto, nenhuma delas é capaz de lidar simultaneamente com as tecnologias WDM e EON. O TONetS [Soares et al. 2007] (*Transparent Optical Network Simulator*) é um simulador para avaliação de redes ópticas WDM transparentes e proporciona a implementação de algoritmos RWA para soluções de técnicas de sobrevivência, estratégias de posicionamento de conversores de comprimentos de onda e políticas para reduzir injustiças no atendimento das conexões ópticas. O SimulNet [Palmieri et al. 2009], um ambiente de simulação de rede óptica especializada fornecendo a base para o estudo e análise das características de plano de controle com a implementação de algoritmos RWA, inclui suporte para redes translúcidas e possibilidade de extensão para o uso de algoritmos RWA que utilizam agregação (*grooming*). O SIMTON (*Simulator for Transparent Optical Networks*) [Chaves et al. 2010] é um simulador WDM projetado para redes ópticas transparentes. O SIMTON é mais completo que os demais mencionados, suas propriedades incluem características da camada física como atenuação, dispersão e ruído na fibra.

Com o surgimento das EONs e devido a impossibilidade de adaptação dos tradicionais simuladores WDM, novas ferramentas de simulação começaram a ser desenvolvidas para atender ao paradigma EON. Em [Asensio et al. 2013] os autores desenvolveram um simulador para EON baseado na biblioteca OMNeT++ [OMNeT++]. Esse simulador implementa um ambiente multicamada para reproduzir as arquiteturas da camada IP/MPLS (*Internet Protocol/Multiprotocol Label Switching*) e óptica, totalmente configurável e que permite implementar e testar novos algoritmos RSA em diversas arquiteturas de forma fácil e rápida. O CEONS (*Complex Elastic Optical Networks Simulator*) [Aibin and Blazejewski 2015] é um simulador de redes ópticas para resolver o problema RSA/RMLSA e de endereçamento de regeneradores. Segundo os autores, o simulador permite o desenvolvimento de algoritmos em diversas linguagens de programação, resolvendo os problemas em cenários de tráfego estático e dinâmico.

¹O simulador ONS encontra-se disponível em <http://comnet.unb.br/br/grupos/get/ons>.

²Note que o problema RMLSA também inclui o problema RSA (*Routing and Spectrum Assignment*).

O FlexGrid [Moura and Drummond], um simulador de eventos discretos para EON, foi construído com base no simulador WDMsim [Drummond]. O ONS é inspirado em ambos, herdando a simplicidade de implementação para a criação de algoritmos RWA e RSA. A novidade está na implementação de algoritmos RMLSA e a execução de ambas as redes WDM e EON. Diversas métricas foram adicionadas e sua personalização ou expansão é facilmente aplicável. A Tabela 1 sumariza as propostas de código aberto apresentadas da literatura e suas características.

Tabela 1. Sumário dos simuladores apresentadas da literatura.

Simulador	Tráfego de Rede	Cenário de Rede		
		WDM	EON	
		RWA	RSA	RMLSA
TONetS [Soares et al. 2007]	Dinâmico	Sim	Não	Não
SimulNet [Palmieri et al. 2009]	Dinâmico	Sim	Não	Não
SIMTON [Chaves et al. 2010]	Dinâmico	Sim	Não	Não
OMNeT++ [Asensio et al. 2013]	Dinâmico	Não	Sim	Não
CEONS [Aibin and Blazejewski 2015]	Estático Dinâmico	Não	Sim	Sim
WDMsim [Drummond]	Dinâmico	Sim	Não	Não
FlexGrid [Moura and Drummond]	Dinâmico	Não	Sim	Não
ONS (http://comnet.unb.br/br/grupos/get/ons)	Dinâmico	Sim	Sim	Sim

3. Simulador ONS

O simulador ONS pode ser logicamente separado em 4 módulos: (i) A configuração do ambiente de simulação; (ii) a geração dos eventos; (iii) a simulação em si; e (iv) a geração e avaliação dos resultados. A Figura 1 mostra o diagrama de funcionamento desses 4 módulos lógicos explicitados em detalhes a seguir:

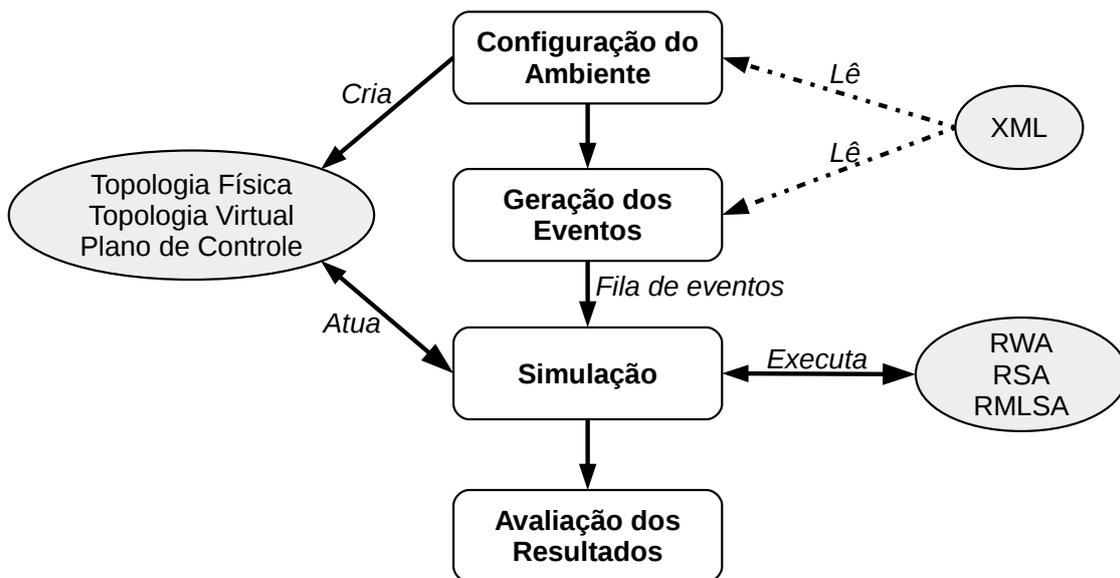


Figura 1. Diagrama de funcionamento do ONS.

Configuração do ambiente de simulação

A configuração do ambiente de simulação é inteiramente feita através da leitura de um arquivo XML³ com os parâmetros de entrada. Cada *tag* fornece um tipo de configuração, entre elas estão: (i) O tipo de simulador (WDM/EON); (ii) o algoritmo (RWA/RSA/RMLSA); (iii) os dados relativos ao cenário de tráfego; e (iv) a configuração da topologia física (número de nós, enlaces, dispositivos e características da rede). Detalhes dessas informações podem ser consultadas no sítio do simulador.

Geração dos eventos da simulação

Cada evento é representado por um fluxo de dados com um nó de origem, um nó de destino e uma quantidade de banda passante. Conforme as informações existentes no XML (*tag <traffic>*), o simulador ONS gera os eventos de chegada e partida de requisição de conexão baseado em informações de carga, tempo médio de duração e taxa de transmissão. A taxa média de chegada é definida a partir da carga imposta, medida em Erlang. A carga pode ser definida como $E = T \times D$, onde E é a carga (Erlang), T é a taxa média de chegada e D é o tempo médio de duração de chamadas. O arquivo XML define as variáveis E e D , de forma que o tempo médio de chegada ($\frac{1}{T}$) possa ser calculado. Em seguida, cada evento é gerado de acordo com um processo de Poisson, que define a distribuição dos tempos de chegada e partida, na qual o tempo médio é normalmente modelado por uma distribuição exponencial negativa baseado no tempo médio de chegada. Os nós de origem e destino dos eventos são escolhidos aleatoriamente com igual probabilidade (distribuição uniforme). As taxas de transmissão são definidas no XML e escolhidas aleatoriamente, sendo que cada taxa possui um tempo médio de duração definido e um peso para distribuição probabilística. A partir de então, uma fila de prioridades é utilizada para armazenar todos os eventos criados (chegadas e partidas), cuja ordenação é feita de acordo com o momento em que os eventos devem ocorrer durante a simulação.

Simulação

A simulação é realizada através da remoção dos eventos ordenados, a partir da fila gerada no módulo anterior. A cada evento na fila (chegada ou partida), o ONS chama o plano de controle que é responsável por registrar os eventos e executar um algoritmo RWA/RSA/RMLSA, baseado nas informações do estado da rede e do evento recebido, que por sua vez, toma a decisão de aceitar ou bloquear uma chamada. Note que, antes de aceitar uma chamada, o algoritmo deve resolver o problema de roteamento (RWA/RSA/RMLSA) através de interfaces do plano de controle, que controla a alocação de recursos na rede. O simulador deve validar os requisitos dos respectivos problemas e então é possível aceitar a chamada.

Avaliação dos resultados da simulação

Durante toda a simulação todas as ações são registradas em um arquivo de *trace*, tais como: (i) Chegadas e partidas de eventos; (ii) criação ou remoção de caminho óptico; e (iii) aceitação ou bloqueio de chamada. Além disso, o ONS ainda fornece uma interface para adição de código para cálculo de estatísticas, a qual pode ser personalizada de acordo com o foco da pesquisa. A interface é facilmente personalizável para a impressão dos resultados em tela (ex. formato CSV) ao término de uma simulação, facilitando a geração automática de gráficos.

³O exemplo do arquivo XML encontra-se disponível em <http://comnet.unb.br/br/grupos/get/ons>.

3.1. Execução do simulador ONS

Por ser implementado em Java, a execução do ONS independe de plataforma, sendo necessário apenas que haja uma máquina virtual Java (JVM 7 ou superior) instalada no sistema operacional. O simulador deve ser executado a partir da linha de comando da seguinte forma:

```
you@computer:~$ java -jar ONS.jar
Usage:ONS simulation_file seed [-trace][-verbose][minload maxload step]
```

Os parâmetros obrigatórios do simulador empregados na linha de comando são os seguintes:

- **simulation_file:** o arquivo XML contendo os parâmetros da simulação;
- **seed:** trata-se de um número no intervalo [1-25] que define 25 diferentes conjuntos de sementes escolhidas internamente para maximizar a qualidade das sequências aleatórias utilizadas. Para a geração de resultados com intervalo de confiança em uma mesma simulação, se faz necessário a execução com diferentes conjuntos de sementes.

Os parâmetros opcionais do simulador são:

- **trace:** ativa a geração do arquivo *trace*;
- **verbose:** ativa o modo de geração de mensagens na tela;
- **minload maxload step:** permite a automação de diversas execuções de uma mesma simulação para uma faixa de cargas no intervalo [minload, maxload] e incremento [step].

A seguir são apresentados exemplos de uso do simulador ONS:

```
you@computer:~$ java -jar ONS.jar nsfnet.xml 1 > saida.txt
```

Neste exemplo, o simulador executará a simulação descrita no arquivo “nsfnet.xml” utilizando o primeiro grupo de sementes. A carga é única e está definida no arquivo XML.

```
you@computer:~$ java -jar ONS.jar nsfnet.xml 2 100 200 20 > saida.txt
```

Neste outro exemplo, o simulador executará a simulação descrita no arquivo “nsfnet.xml” utilizando o segundo grupo de sementes para uma faixa de cargas em Erlang que vai de 100 a 200, com incrementos de 20, ou seja, serão executados 6 simulações com as cargas [100, 120, 140, 160, 180, 200].

A Figura 2 apresenta exemplos de saída de uma simulação no cenário de rede WDM e EON. Note que esta saída pode ser personalizada. Observe que o simulador apresenta resultados de taxa de bloqueio (BR), taxa de bloqueio de banda (BBR), taxa de bloqueio por classe de serviço (COS), número de caminhos ópticos (LPs) estabelecidos na rede, percentual médio de transmissores disponíveis em toda a simulação, número de transmissores por requisição⁴, e média de saltos virtuais e físicos por requisição. Para o cenário EON são adicionadas as métricas de percentual médio de espectro disponível em toda a simulação e percentual médio de uso por modulação.

4. Demonstração para o salão de ferramentas

Para demonstrar a utilização do simulador ONS é preterivelmente necessário uma máquina Dual Core com pelo menos 2GHz e 4GB de RAM, onde serão feitas as execuções de duas aplicações, sendo uma para WDM e outra para EON. Além disso, uma segunda máquina⁵ será empregada para exibir detalhes da obtenção do simulador, instalação e

⁴Quando considerado técnicas de agregação de tráfego (*grooming*), um transmissor pode trafegar mais de uma requisição.

⁵Os autores poderão usar os notebooks próprios.

```

*****
BR      : 17.401%
BBR     : 19.819853%
Called Blocked by COS (%)
BP-0    13.872051%
BP-1    17.961311%
BP-2    23.277143%

LPs: 52831
Available Transponders: 35.11159896850586%
Transponders per request: 0.6396082277025146
Virtual Hops per request: 1.0
Physical Hops per request: 2.2926790881245536

```

(a)

```

*****
BR      : 4.9059997%
BBR     : 5.2949085%
Called Blocked by COS (%)
BP-0    3.804479%
BP-1    5.0312014%
BP-2    5.875493%

LPs: 83503
Available Transponders: 18.150667190551758%
Transponders per request: 0.878110080551875
Virtual Hops per request: 1.0
Physical Hops per request: 2.561959745094328
Spectrum Available: 78.775%
BPSK Modulation used: 18.195753%
QPSK Modulation used: 45.88458%
8QAM Modulation used: 26.916399%
16QAM Modulation used: 9.003269%

```

(b)

Figura 2. (a) Exemplo de saída de uma simulação no cenário de rede WDM. (b) Exemplo de saída de uma simulação no cenário de rede EON.

funcionamento. Para demonstração da aplicação WDM será apresentado um algoritmo RWA explorando as possibilidades de determinação da rota, facilmente obtida a partir dos utilitários disponibilizados na ferramenta. Analogamente, a segunda aplicação a ser demonstrada é o algoritmo RMLSA para EON, que seleciona um nível de modulação dentre as oito disponíveis na ferramenta.

Quanto aos detalhes de instalação do simulador, orientações serão passadas sobre o seu funcionamento. Algumas configurações precisam ser ajustadas para cada tecnologia (WDM ou EON), como é o caso de componentes como os enlaces e nós ópticos. Outro ponto importante é o acompanhamento estatístico da simulação, que produz múltiplos dados a respeito do desempenho da rede, úteis para a caracterização dos experimentos.

5. Resultados e validação

Com o objetivo de validar a ferramenta de simulação foram realizados vários testes de verificação e análises de *traces* em diversas topologias de rede. Foram realizadas validações através de comparações com resultados de simulação de outros trabalhos, todas modeladas e testadas com sucesso.

Para a verificação do cenário de redes WDM, foi utilizado o simulador de redes ópticas WDMsim [Drummond]. Foram executados diversos algoritmos RWA em ambos os simuladores (ONS e WDMsim) e seus resultados obtiveram exatamente os mesmos valores para todas as métricas em comum.

Para a verificação do cenário em EON, foram realizadas comparações de resultados de outros trabalhos da literatura [Wan et al. 2012]. A Figura 3 mostra os resultados obtidos no ONS para a topologia NSFNET (14 nós e 44 enlaces) usada no mesmo artigo. Cada simulação foi realizada cinco vezes utilizando diferentes conjuntos de sementes (replicações independentes). Para os resultados apresentados foram calculados intervalos de confiança com 95% de confiabilidade. São demonstrados os valores de probabilidade de bloqueio e taxa média de uso do espectro para os dez algoritmos RSA apresentados em [Wan et al. 2012] nos níveis de modulação $m = 2$ (2 bits por símbolo) e $m = 4$ (4 bits por símbolo).

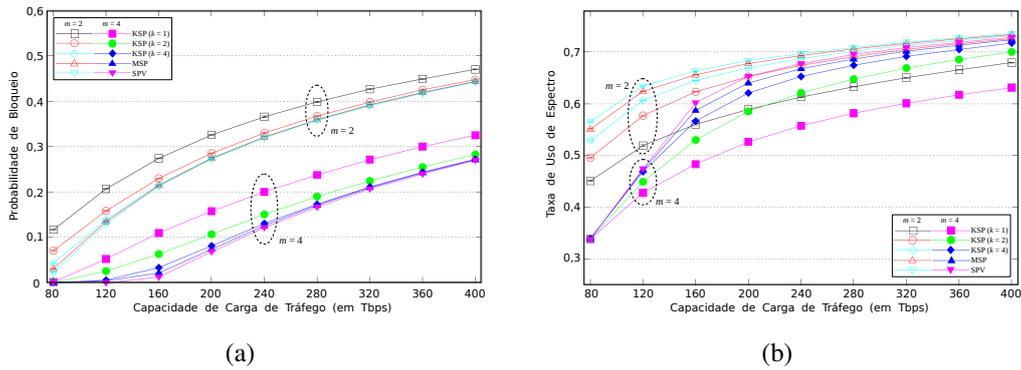


Figura 3. (a) Resultados de simulação do ONS para o percentual de bloqueio. (b) Resultados de simulação do ONS para taxa de uso do espectro.

Os autores calculam a capacidade da carga de tráfego através da equação: $\rho \times \bar{C}$, onde ρ é a carga de tráfego em Erlang e \bar{C} é a taxa média de bits igual a 105 Gbps. Pode-se observar na Figura 3(a) que à medida que a carga cresce, a probabilidade de bloqueio dos algoritmos aumenta para ambas as modulações. Observa-se ainda que os resultados apresentados aproximam-se bastante dos resultados disponibilizados de [Wan et al. 2012]. A Figura 3(b) mostra os resultados da taxa de uso do espectro. Observa-se que o uso do espectro cresce à medida que a carga de tráfego aumenta. Isso se deve ao fato que, o aumento da carga, implica na tentativa do estabelecimento de mais circuitos, que por sua vez, aumenta o nível de utilização do espectro na rede. Novamente os resultados obtidos no ONS são bastante próximos dos apresentados em [Wan et al. 2012]. A Tabela 2 mostra os resultados de alguns algoritmos e os seus respectivos tempos de execução em uma máquina Intel Core 2Quad 2.66GHz com 4GB de RAM. É possível observar que o ONS obteve um desempenho satisfatório mesmo com o aumento da carga de tráfego.

Tabela 2. Tempo médio de execução dos algoritmos no simulador ONS para 100.000 chamadas na topologia NSFNET (14 nós e 44 enlaces).

Algoritmo	Carga de Tráfego		
	80 Tbps	240 Tbps	400 Tbps
KSP(k=4)(m=2)	63,98s	71,62s	67,00s
KSP(k=4)(m=4)	53,70s	66,70s	67,57s
SPV(m=2)	741,42s	289,09s	207,96s
SPV(m=4)	725,12s	284,99s	208,14s

Diversos outros estudos e avaliações de métricas podem ser feitas com a utilização da ferramenta de simulação ONS. A título de exemplo, o ONS está sendo utilizado pelo grupo de pesquisa em engenharia de tráfego da Universidade de Brasília (GET) para a resolução do problema RSA/RMLSA com o uso de técnicas de agregação óptica para a alocação dos recursos e previsões de novas funcionalidades, tais como roteamento multi caminho, técnicas para a proteção parcial e o roteamento e atribuição de espectro ciente da aplicação para Múltiplas Transferências de Dados em Massa (MBDT).

6. Considerações finais

Este artigo apresentou a ferramenta de simulação de redes ópticas ONS, desenvolvida com o objetivo de proporcionar um ambiente para a exploração de novos protocolos para os cenários de rede WDM e EON. Sua capacidade inclui desenvolver e avaliar novas pesquisas relacionadas aos problemas RWA, RSA e RMLSA no cenário de tráfego de rede dinâmico. O ONS proporciona uma implementação ágil e um desempenho satisfatório mesmo quando simulado em grandes topologias de rede, tornando-se uma ferramenta útil para a comunidade de pesquisa de redes ópticas.

Com o propósito de validar a ferramenta, foram realizados vários testes e validações parciais através de comparações com resultados de simulação de relevantes trabalhos da literatura. Atualmente, o simulador ONS está sendo utilizado e aprimorado pelo grupo de pesquisa em engenharia de tráfego da Universidade de Brasília (UnB). Sua infraestrutura já foi utilizada em diversos trabalhos e seminários da equipe.

Referências

- [Aibin and Blazejewski 2015] Aibin, M. and Blazejewski, M. (2015). Complex elastic optical network simulator (ceons). In *17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2015*, pages 1–4.
- [Asensio et al. 2013] Asensio, A., Castro, A., Velasco, L., and Comellas, J. (2013). An elastic networks omnet++-based simulator. In *15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2013*, pages 1–4.
- [Chaves et al. 2010] Chaves, D. A. R., Pereira, H. A., Bastos-Filho, C. J. A., and Martins-Filho, J. F. (2010). Simton: A simulator for transparent optical networks. *Journal of Communication and Information Systems*, 25(1):1–10.
- [Drummond] Drummond, A. C. WDMsim: WDM Optical Network Simulator. <http://www.lrc.ic.unicamp.br/wdmsim/>.
- [Moura and Drummond] Moura, P. M. and Drummond, A. C. FlexGridSim: Flexible Grid Optical Network Simulator. <http://www.lrc.ic.unicamp.br/FlexGridSim/>.
- [OMNeT++] OMNeT++. OMNeT++ Discrete Event Simulator. <http://www.omnetpp.org/>.
- [Palmieri et al. 2009] Palmieri, F., Fiore, U., and Ricciardi, S. (2009). Simulnet: a wavelength-routed optical network simulation framework. In *IEEE Symposium on Computers and Communications, 2009. ISCC 2009.*, pages 281–286.
- [Soares et al. 2007] Soares, A., aes, G. D., Giozza, W., and Cunha, P. (2007). Tonets: Simulador para avaliação de desempenho de redes Ópticas transparentes. *WPerformance, V Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação*, 27:581–594.
- [Wan et al. 2012] Wan, X., Hua, N., and Zheng, X. (2012). Dynamic routing and spectrum assignment in spectrum-flexible transparent optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 4(8):603–613.