

Transferências de Dados em Massa Sensíveis ao Consumo Energético em Redes Ópticas Elásticas

Maurílio H. R. Miranda¹, Léia S. Sousa¹, Lucas R. Costa¹, André C. Drummond¹

¹Departamento de Ciência da Computação – Universidade de Brasília (UnB)
Caixa Postal 4.466 – 70910-900 – Brasília – DF – Brasil

{rodrigues.maurilio, leia.unb, lucasrc.rodri}@gmail.com, andred@unb.br

Abstract. *Energy consumption in core networks is currently impacted by Bulk Data Transfer (BDT) applications between the major Data Centers (DCs) of the Internet. This is because these applications consume most of the available resources, and do so for long periods of time. Due to the increase in network traffic that occurs each year, one of the major challenges for cloud service providers is energy efficiency. In order to serve the growing demand, the Elastic Optical Networks (EON) paradigm has been proposed with the purpose of satisfying requests with greater flexibility, taking advantage fuller of the frequency spectrum. This paper proposes the Energy Efficient Aware-BDT in EON (EEABE) solution, an Energy Efficiency-aware Routing and Spectrum Allocation (RSA) algorithm to perform inter-DC BDT (IDC), which is capable of scheduling BDT requests and implementing the sleep mode technique to reduce the energy consumption of the switching elements in the optical network.*

Resumo. *O consumo energético nas redes de núcleo atualmente é impactado pelas aplicações de Bulk Data Transfer (BDT) entre os principais Centros de Dados (CDs) da Internet. Isso ocorre porque essas aplicações consomem a maior parte dos recursos disponíveis e o fazem por longos períodos de tempo. Devido ao aumento do tráfego na rede, que ocorre a cada ano, um dos principais desafios para os provedores de serviço em nuvem é a eficiência energética. Para servir à crescente demanda, o paradigma das Redes Ópticas Elásticas (EON) têm sido proposto com o objetivo de atender requisições com maior flexibilidade, aproveitando melhor o espectro de frequência. Este artigo propõe a solução Energy Efficient Aware-BDT in EON (EEABE), um algoritmo de Roteamento e Alocação de Espectro (RSA) ciente de eficiência energética para realizar BDT inter-CD (ICD), que é capaz de escalonar requisições BDT e implementar a técnica de sleep mode para reduzir o consumo energético dos elementos comutadores na rede óptica.*

1. Introdução

O tráfego na Internet vem aumentando nos últimos anos de maneira abrupta quando comparado aos primeiros anos de expansão e popularização dessa rede. Demandas do tipo *streaming* de vídeo, aplicações em tempo real, serviços de computação em nuvem, dentre outras, estão exigindo infraestruturas cada vez mais sofisticadas para continuar atendendo a crescente necessidade por largura de banda. Semelhante ao tráfego, o consumo energético das redes de núcleo também tem crescido na mesma

proporção e, por isso, tem sido pautado com relevância pela academia. Atualmente, as redes de comunicações são um dos maiores consumidores de energia da área de Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC), constituindo cerca de 37% do total [Idzikowski et al. 2016].

Neste cenário, aplicações que realizam transferências de dados em massa (BDT) têm representatividade de 45% do tráfego total ICD e 20% da energia consumida em um CD [Lu et al. 2017]. As BDTs são definidas como grandes volumes de dados transferidos entre um ou vários CDs. *Backups*, clones de máquinas virtuais, atualizações de sistemas operacionais e servidores são alguns exemplos. Uma característica importante de uma BDT é sua tolerância a atrasos, pois é definido um prazo máximo (*deadline*) dentro do qual a transferência deve ocorrer [Chen et al. 2017]. Assim, muitas vezes, essas tarefas ocorrem em segundo plano, causando elevadas taxas de bloqueio deste tipo de tráfego.

Outro problema que vários estudos têm dado ênfase (e.g. [Sousa and Drummond 2017], [Chen et al. 2017] e [Ji et al. 2018]) refere-se ao comportamento de uma BDT inter-CD, posto que o agendamento e alocação do espectro de frequência deve acontecer dentro do prazo previsto. Uma técnica para lidar com essa abordagem é escalonar a demanda em horários com baixo fluxo de tráfego, tais como no período noturno. Portanto, o escalonamento de requisições tem sido uma técnica útil para reduzir taxas de bloqueio do tráfego ICD [Sousa and Drummond 2017].

Nesse contexto descrito até aqui, as limitadas larguras de banda em diversas tecnologias nas redes atuais que não ultrapassam dezenas de *Gb/s* por canal, precisarão de uma infraestrutura robusta e escalável nos próximos anos. Em torno desta problemática, as Redes Ópticas Elásticas (EONs) têm sido propostas como uma nova tecnologia das redes de transporte [Jinno et al. 2009].

As EONs possuem uma arquitetura composta por transpônderes (SBVT – *Sliceable BVT*) e comutadores (BV-OXC, também denominado OXC), ambos com largura de banda variável. Os SBVTs implementam a tecnologia *Optical - Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (O-OFDM) que permite a modulação do sinal óptico sob a forma de diversas portadoras, configuradas de acordo com a distância da transmissão. Por outro lado, os BV-OXCs são responsáveis por estabelecer os caminhos ópticos entre origem e destino. A articulação dessa arquitetura para atender uma demanda de requisição é feita pelo algoritmo de roteamento e alocação de espectro (RSA), com o objetivo de disponibilizar ao máximo o espectro de frequência e definir os percursos, também chamados *lightpaths*, para cada demanda da rede [Jinno et al. 2009, Idzikowski et al. 2016]. Para atingir esse objetivo, o RSA é realizado sob os seguintes princípios:

- Continuidade da mesma faixa de espectro durante todo o percurso de um tráfego.
- Alocação contígua para *slots* de frequência pertencentes a uma requisição.
- Não sobrepor espectro para duas demandas.
- Manter *slots* (banda de guarda) entre os espectros alocados para que não haja interferências.

Os novos e mais modernos elementos comutadores são totalmente transparentes e a adoção de formatos para modular os sinais ópticos de dados reduzem a utilização de equipamentos que regeneram sinais ao longo dos caminhos ópticos [Idzikowski et al. 2016]. Entretanto, na engenharia de tráfego é possível adotar a técnica

de *sleep mode*, por meio da qual as soluções de RSA são definidas de maneira mais eficiente, desabilitando temporariamente equipamentos ociosos, ou ainda, estabelecendo caminhos ópticos que aproveitem os equipamentos que já estão em uso.

O *sleep mode*, utilizado em rede ópticas tanto convencionais como elásticas, funciona da seguinte maneira: os equipamentos identificados como ociosos são desligados ou colocados em modo de espera [Idzikowski et al. 2016] para economizar energia. Trata-se de uma técnica similar ao conceito de *stand-by* dos equipamentos eletrônicos convencionais que se encontram em estado de economia, porém, se houver demanda, o equipamento volta a ficar ativo (modo *wake*); caso contrário, mantêm-se inativos (modo *sleep*). Com essa técnica, [Wong et al. 2009] e [Bokhari et al. 2016] registraram aproximadamente 50% na redução do consumo energético em ambientes de redes ópticas com a implementação do *sleep mode*.

Com base nos conceitos elencados até aqui, este trabalho propõe o algoritmo *Energy Efficient Aware-BDT in EON* (EEABE), focando especificamente em EON, BDT e eficiência energética. O objetivo central do EEABE é diminuir o consumo energético exigido para o atendimento de requisições do tipo BDT em um ambiente de EON utilizando a técnica de *sleep mode* sem aumentar a taxa de bloqueio das requisições. Para isso, duas estratégias foram estabelecidas:

- Definir uma janela de escalonamento utilizada para armazenar requisições de BDT com prazo suficiente para atendimento.
- Gerar rotas que ativem o menor número de nós e deixando desligados nós sem demanda.

A principal contribuição deste trabalho é a proposta de solução que garante uma melhor taxa de aceitação para uma classe de tráfego específica, ao mesmo tempo que melhora a eficiência de energia na rede em comparação com outras soluções para BDT. Além disso, um extensivo levantamento da literatura é apresentado para situar os tópicos de redução do consumo energético e tecnologias verdes nas próximas gerações de redes ópticas. Os principais resultados alcançados foram de aumento na eficiência energética, especialmente em cenários com baixa e média carga de tráfego, sem elevar a taxa de bloqueio.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte maneira: a Seção 2 apresenta um estudo dos trabalhos relacionados; a Seção 3 inclui conceitos básicos para o entendimento da proposta; a Seção 4 apresenta o algoritmo EEABE; a Seção 5 descreve a metodologia da simulação, cenários e apresentação dos resultados, além da Seção 6, que conclui este artigo.

2. Trabalhos Relacionados

O crescente número de soluções propostas na literatura para lidar com o desafio da eficiência energética exploram principalmente a aplicação da técnica de *sleep mode* [Tafari et al. 2012, Kang et al. 2012, Khumalo and Nleya 2018] e grafo auxiliar [Costa and Drummond 2018]. Em [Tafari et al. 2012] é definido o limite de consumo em 30%, aproximadamente, quando um nó está no modo de espera. O consumo em cada nó da rede ajusta-se conforme a demanda para alterar o seu estado, isto é, quando o tráfego

aumenta, diminui-se o limite de consumo; caso contrário, aumenta-se esse limite. Os autores também propõem uma média de tráfego recente para definir se muda de estado ou não.

Já em [Kang et al. 2012], considera-se o limite de 10% do consumo total, bem como o consumo durante as transições do estado *wake* para *sleep*. Se o tempo de transição (0.45 ms adotados pelos autores) for maior do que o tempo no qual o nó ficará em modo de espera, então o modo *sleep* gerará desperdício de energia, já que a transição é também consumidora. A ideia é acumular o tráfego para que não entre no modo *sleep* por pouco tempo.

Com ideia semelhante, [Khumalo and Nleya 2018] propõem manter um nó em modo *sleep* por mais tempo. Dispositivos que são ligados e desligados várias vezes podem falhar, segundo esses autores. Assim foi realizada uma análise de vida útil e confiabilidade nos equipamentos que ficam em *sleep mode*. O fator de aceleração do tempo de vida útil é, então, calculado baseado em variações da temperatura do equipamento em *wake* e *sleep mode*. Em teste de simulação, um amplificador de sinal óptico (EDFA - *Erbium Doped Fiber Amplifiers*) foi utilizado a 25% de sua eficiência máxima em estado de *sleep mode*. Os outros equipamentos foram testados na capacidade máxima de energia.

A abordagem de [Costa and Drummond 2018] mostra uma redução em 54% da taxa de bloqueio e 10% a menos no consumo energético com uma proposta de grafo auxiliar composto de técnicas com agregação elétrica e óptica para reduzir a utilização dos dispositivos (transponders e comutadores) presentes na topologia. Outros resultados relevantes, tais como [Bokhari et al. 2016] e [Wong et al. 2009] mostram que a eficiência energética pode ser melhorada entre 40% a 60% usando os princípios do *sleep mode* em Redes Ópticas Passivas: colocar o nó em modo de suspensão quando não houver tráfego de entrada ou saída.

Entretanto, nenhum desses trabalhos que lidam com eficiência energética tratam diretamente do tráfego BDT. A respeito desse tipo de aplicação, [Van et al. 2017] propõe um *framework* para agendar requisições com desempenho superior às estratégias de algoritmos preemptivos e não preemptivos em redes ópticas, considerando a interferência do atraso de reconfiguração e tempo de ativação dos dispositivos na metodologia desenvolvida. Por outro lado, janelas flexíveis (com tamanhos variados) são exploradas em [Afsharlar et al. 2017] para impedir que qualquer requisição já alocada completamente seja interrompida por solicitação de provisionamento ou reprovisionamento. Assim, quanto maior a janela, menor é a taxa de bloqueio, embora haja registro no aumento do atraso para atendimento, não sendo recomendável janelas maiores em tráfego sensível ao atraso.

Já em [Charbonneau and Vokkarane 2012] a ciência do tempo de espera da requisição contribui para melhores decisões e aumentar a alocação de recursos e, conseqüentemente, aprimoram a *Quality of Service* (QoS). O tráfego é tratado como estático e dinâmico. São feitas reservas imediata e antecipada no sentido de estipular recomendações para transferir grandes quantidades de tráfego com janela flexível, configurando-se a duração da demanda e opções para definição (ou não) do tempo inicial das solicitações. Em [Sousa and Drummond 2017] é apresentada uma solução ciente da aplicação BDT através da resolução do RSA em EON, cujo resultado possui 70% de

eficiência na aceitação do tráfego se comparado com um cenário não ciente. Porém, essa solução ciente da aplicação não aborda o contexto da eficiência energética.

3. Conceitos Fundamentais

Antes de descrever a solução proposta através do EEABE, as próximas seções explicarão alguns conceitos pertinentes ao algoritmo, principalmente no que tange o escalonamento das transferências de dados em massa (BDT), janela de requisições, modelo de eficiência energética e a técnica de *sleep mode*.

3.1. Escalonamento de BDT

As características de uma BDT – grandes volumes de dados com tolerância ao atraso – permitem a utilização do escalonamento de requisições e pode contribuir de maneira efetiva para a redução da taxa de bloqueio e aumento das chances para atender uma BDT, segundo [Van et al. 2017] e [Afsharlar et al. 2017]. São várias as opções de escalonamento, algumas mais eficientes, outras menos; dependendo das prioridades, políticas e algoritmos adotados [Chen et al. 2017]. Dentre as opções mais tradicionais, destacam-se:

Earliest Deadline First (EDF): as solicitações com prazo mais próximo são atendidas primeiramente, ou seja, aquelas que têm menos tempo para serem finalizadas.

Shortest Job First (SJF): neste caso a prioridade são as requisições com menor quantidade de dados.

First-In-First-Out (FIFO): primeira demanda solicitada será atendida primeiro, ou seja, ordem de chegada. Torna-se mais justa quando o prazo é igual para todas requisições.

Definir o melhor escalonamento de requisições, portanto, não é tarefa trivial. Ao priorizar algumas demandas, outras não serão atendidas. Assim, a taxa de bloqueio (*TxBloq*), descrita na Equação 1, torna-se uma métrica relevante e evidencia quantitativamente (geralmente em porcentagem) se as requisições foram atendidas. Quanto menor for a taxa de bloqueio, mais efetivo será o algoritmo de escalonamento.

$$TxBloq = \left(1 - \frac{TotalDeDadosAceitos}{TotalDeDadosTransmitidos}\right) * 100 \quad (1)$$

Quando há políticas de QoS envolvidas ou ambientes com recursos escassos, um escalonamento com políticas de prioridades pré-definidas é uma alternativa viável através de técnicas que analisam a rede e previsões de tráfego. Assim, haverá provimento de reserva desses recursos e menores taxas de bloqueio. Já nos casos em que as técnicas de reserva imediata são suscetíveis a resultados indesejados, esta abordagem torna-se inviável [Charbonneau and Vokkarane 2012].

A implementação do escalonamento de BDT no EEABE baseia-se em uma janela de requisições que não puderam ser atendidas no momento em que chegaram. Na sequência, o prazo restante desta solicitação é verificado e, caso esteja próximo do fim, uma banda suficiente para tal atendimento é alocada. A cada chegada ou saída de uma requisição ou a cada tempo de solicitação que atinge o limite, deve-se fazer uma atualização da janela.

3.2. Sleep Mode

Para que haja eficiência energética em uma rede óptica, ao entrar em *sleep mode*, o consumo dos nós de comutação óptica é reduzido, conforme Equação 8 para valores que oscilam entre 10% [Kang et al. 2012] e 30% [Tafani et al. 2012] da capacidade total.

Em EON – e, conseqüentemente, no EEABE – são os comutadores ópticos que terão os seus consumos reduzidos e atuarão em um modo denominado *by-passing*, ou seja, o equipamento manterá a sua capacidade de comutação pré-configurada enquanto estiver em *sleep mode*. E, quando o nó se tornar origem ou destino de alguma requisição, ele passará para *wake mode*, ativando o estado com consumo total de energia. Quando um nó tiver que ser configurado para realizar comutação, também ficará em *wake mode*.

Nesse sentido, um modelo de eficiência energética se faz necessário para mensurar o consumo de uma EON considerando a existência de diversos estudos realizados pela academia, dentre eles [Tafani et al. 2012], [Idzikowski et al. 2016], [R. Ren and Yang 2016] e [Costa and Drummond 2018], os quais ressaltam que os principais consumidores de energia são equipamentos como, por exemplo, transponders, comutadores e amplificadores. Assim, temos o seguinte modelo energético:

Potência do SBVT: cálculo baseado em um transponder óptico convencional.

$$P_{SBVT} = 1,683 * TR + 91,333 \quad (2)$$

Onde: TR representa a taxa de transmissão, em Gb/s ; 1,683 representa um fator de sobrecarga, além de 91,333 W que é adicionado quando o transponder estiver ocioso. A unidade de medida para P_{SBVT} é em $Watt (W)$.

Consumo do OXC: envolve o período de configuração do mesmo, C_{OXC}^{setup} . Em operação plena (P_{OXC}^{op}), um comutador gasta 150 W .

$$C_{OXC}^{setup} = N * 85 + \varepsilon * 100 \quad (3)$$

Onde: N representa o número de fibras conectadas ao equipamento; ε , o número de canais (ativos ou não). A unidade de medida para C_{OXC}^{setup} é em $Joule (J)$.

A partir das Equações 2 e 3 origina-se: a potência de um *lighthpath* (Equação 4), o consumo energético em uma requisição de tráfego (Equação 5) e o consumo total da rede (Equação 6), além da eficiência energética desta rede (Equação 7).

Potência de um lighthpath: obtido por meio do somatório da potência dos transponders, comutadores em operação e amplificadores, geralmente instalados a cada 80 km .

$$P_{LP} = P_{SBVT} + \sum_{i=1}^C P_{OXC}^{op} + \sum_{j=1}^A P_{EDFA_j} \quad (4)$$

Onde C representa o conjunto de comutadores ópticos e A , o de amplificadores. Estes possuem uma potência (P_{EDFA}) padrão de 100 W e a unidade de medida para P_{LP} é dada em W .

Consumo de uma requisição: é o somatório da potência de todos os *lighpaths* multiplicado pelo *holding time* (h) da requisição; juntamente com o somatório consumido pelos comutadores (C_{OXC}^{setup}).

$$C_{req} = \left(\sum_{i=1}^L P_{LP_i} \right) * h_i + \sum_{j=1}^C C_{OXC}^{setup} \quad (5)$$

Onde L representa cada caminho óptico usado pela requisição e C , o grupo de comutadores. A unidade de medida para C_{req} é dada em J .

Consumo total da rede: é, então, a soma consumida de todas requisições.

$$C_{total} = \sum_{i=1}^R C_{req_i} \quad (6)$$

Onde: R representa o número das requisições de tráfego atendidas e a unidade de medida para C_{total} é dada em J .

Eficiência Energética da rede: e, por fim, a eficiência energética é o quociente entre os dados transmitidos (em *bits*) e o consumo total da rede (Equação 6). Assim, a unidade de medida para $EnEff$ é dada em *bits/J*.

$$EnEff = \frac{TotalDeDadosTransmitidos}{C_{total}} \quad (7)$$

A aplicação do *sleep mode* nesta modelagem ocorre na Equação (4). Nela é adicionada um fator β_i para ponderar a energia na potência dos comutadores, conforme a Equação (8). No trabalho de [Tafari et al. 2012], este fator foi padronizado como 0,3, ou seja, no modo de espera o comutador atua a 30% de sua capacidade máxima.

$$P_{LP} = P_{SBVT} + \sum_{i=1}^C \beta_i P_{OXC}^{op} + \sum_{j=1}^A P_{EDFA_j} \quad (8)$$

Existe também a necessidade de considerar a transição de estado. Segundo [Khumalo and Nleya 2018], as transições consomem tempo e energia devendo, portanto, serem consideradas e transições desnecessárias tendem a desperdiçar energia e diminuir o tempo de vida do equipamento. A Figura 1 mostra um diagrama de estados baseado em [Li et al. 2015] e adaptado para a atuação do EEABE. Nela, verificam-se os estados *off*, *wake* e *sleep*, além das transições possíveis entre eles, associados respectivamente ao tempo que levam para ocorrer.

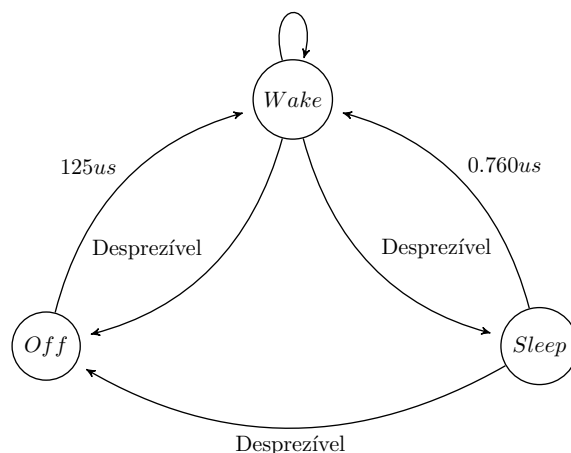


Figura 1. Diagrama de estados em um nó configurado com *sleep mode*

Em algumas transições de estado, o consumo de energia é suficientemente pequeno e, por isso, é considerado como "Desprezível". O tempo gasto na transição que é levado em consideração neste trabalho, diz respeito à transição entre os estados *off-wake*, equivalente a $125 \mu s$, que ocorre quando o comutador óptico é ativado para obter o máximo do seu consumo, e por isso leva mais tempo do que o caso da transição *sleep-wake*, que ocorre em $0.760 \mu s$.

4. Transferências de Dados em Massa Ciente da Eficiência Energética em Redes Ópticas Elásticas (EEABE)

O EEABE (Algoritmo 1) é introduzido para prover um RSA ciente da eficiência energética no atendimento de BDT e recebe como entrada um grafo $G(V, E)$, que representa a topologia da rede (sendo V o conjunto de nós e E , os enlaces), um conjunto de requisições $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ e K , referente ao número dos menores caminhos entre dois nós quaisquer, providos por um algoritmo de roteamento KSP [Yen 1971]. Cada requisição r_i , com $i \in \{1, 2, \dots, m\}$ tem o formato (s, d, Dl, C) , onde s é a origem, d é o destino, Dl representa o *deadline* e C é a quantidade de dados a ser transferida.

Na linha 1 é inicializada uma janela W (operação *offline*) para a qual todas as requisições do conjunto R que chegam são encaminhadas (na linha 4), tanto recém-chegadas quanto antigas, ou seja, que já tentaram atendimento em momentos anteriores. Outra ação *offline* se encontra na linha 2, na qual são criadas estruturas com os K menores caminhos, disjuntos ou não. Na sequência, a janela W executa uma rotina com remoção de chamadas que não serão atendidas devido ao prazo encerrado como mostra a linha 5, e, posteriormente, as requisições serão ordenadas (linha 6) do menor para o maior *deadline*.

Para cada requisição da janela W é executado o laço compreendido no intervalo das linhas 7-18, que se inicia da seguinte maneira: na linha 8 é formado um conjunto P com os K menores caminhos computados com algoritmo KSP de [Yen 1971]; o procedimento $WakeMin(P)$ da linha 9 ordena esses caminhos de maneira crescente pelo número de nós que já estão em atividade, com o objetivo de selecionar o caminho mais econômico, ou seja, aquele que ativará menos equipamentos. O nó só é colocado em *wake mode* se ele for origem ou destino da requisição ou permanecerá em *sleep mode* caso seja um nó intermediário, configurando dessa maneira um *bypass óptico*.

Na linha 11, através da função SA , é verificado se o caminho testado atende as restrições de continuidade do enlace, contiguidade de espectro, banda de guarda e disponibilidade da largura de banda para atender a requisição com taxa máxima ou mínima. Em caso positivo, a requisição é aceita na linha 12. O laço das linhas 10-17 garante que todos os caminhos sejam testados.

Caso as condições estabelecidas na linha 11 não sejam atendidas, a requisição não é bloqueada. Como nas primeiras etapas, r' é inserida em W (linha 4), todas as requisições com *deadline* insuficiente são removidas e bloqueadas (linha 5), sendo reordenadas em seguida com o procedimento $Ordena(W)$ (linha 6). Assim, as requisições presentes na janela sempre estarão prontas para serem submetidas ao RSA enquanto o seu *deadline* não tiver encerrado. Portanto, a função da janela W é auxiliar o escalonamento de requisições, cuja prioridade será para aquelas com o menor *deadline*, além de proporcionar uma segunda chance às requisições não atendidas pelo RSA na primeira tentativa.

Algoritmo 1 EEABE(G, R, K)

```

1:  $W \leftarrow \emptyset$  (offline)
2:  $KSP \leftarrow$  todos os  $k$  menores caminhos (offline)
3: para cada  $r$  faça
4:    $W \leftarrow r$ 
5:    $RemoveAtrasados(W)$ 
6:    $Ordena(W)$ 
7:   para cada  $r' \in W$  faça
8:      $P \leftarrow KSP(r', K)$ 
9:      $WakeMin(P)$ 
10:    para cada  $p \in P$  faça
11:      se  $SA(r', p, MAX)$  ou  $SA(r', p, MIN)$  então
12:         $Aceita(r')$ 
13:         $Break()$ 
14:      senão
15:         $Remove(p)$ 
16:      fim se
17:    fim para
18:  fim para
19: fim para

```

Existe a possibilidade de caminhos candidatos do conjunto P não atenderem os requisitos de atribuição do espectro para a requisição r' (condições da linha 11), principalmente quando houver grande quantidade de tráfego na rede. Nesse caso, o algoritmo entrará na linha 15 com a execução da rotina $Remove(p)$ que libera o espectro definido, à princípio, para r' . Esta, por sua vez, continua na janela W e, ao terminar de ser verificada (ou seja, encerrando o laço da linha 7), o laço mais externo do algoritmo (linha 3) verificará novas requisições em R e fará novo processo de escalonamento (linhas 4 a 6). Esse procedimento explicita uma das principais vantagens do EEABE que, além da projeção em reduzir consumo energético, uma requisição não é bloqueada quando não for possível alocar espectro, mas sim apenas se o prazo (*deadline*) esgotar.

4.1. Análise da Complexidade do EEABE

A janela W inicializada na linha 1 tem tempo constante. A operação *Remove-Atrasados*(W) da linha 5 requer que toda a janela seja percorrida para que seja possível remover uma requisição da fila de prioridade, tomando, para isso, $O(n)$, uma vez que não é suficiente apenas verificar se seu *deadline* é o menor. Aqui n representa o número máximo de requisições que a janela pode ter, caracterizando n repetições que o laço da linha 7 exige. A ordenação da linha 6 exige $O(\log(n))$. Na linha 8, o *KSP* é executado *offline*, fazendo com que sua complexidade seja $O(k)$, onde k é o número dos menores caminhos formados.

A função *Wakemin*(P) da linha 9 consome $O(k * |V| * \log(k))$ ou, aproximadamente $O(k^2V)$, uma vez que recebe uma lista com $|k|$ caminhos que são, então, varridos e ordenados em ordem crescente do número de nós com dispositivos comutáveis que requerem ativação. Já a verificação de disponibilidade dos recursos do espectro na linha 11, respeitando-se as restrições do RSA, leva $O(|E||S|)$, sendo $|E|$ o tamanho do conjunto de enlaces e $|S|$ o número máximo de *slots* em cada enlace. Essa complexidade se justifica porque cada caminho $|E|$ é varrido para detectar e interseccionar os $|S|$ *slots* de espectro. A operação *Remove* (p) leva tempo constante para ser realizada.

Desta maneira, as maiores complexidades de todo o algoritmo estão (i) na busca de recursos do espectro dos k menores caminhos ($O(k * |E||S|)$) e (ii) na realização da operação *WakeMin*(P) para cada caminho ($O(k^2V)$). Com as n repetições do laço da linha 7 ($O(n)$), temos que a complexidade total do EEABE é de $O((k * |E||S| + k^2V) * n)$.

5. Simulação e Análise de Resultados

O algoritmo EEABE foi implementado no *Optical Networks Simulator* (ONS¹) [Costa et al. 2016]. Os resultados das simulações foram comparados entre os seguintes algoritmos: AARSAEW e AARSAE [Sousa and Drummond 2017] – utilizados como referência no nosso estudo, uma vez que lidam com o tráfego de BDT – e EEABE para escalonar requisições BDT e usufruir dos benefícios do *sleep mode*:

AARSAE: sem janela de escalonamento e sem eficiência energética (*sleep mode*).

AARSAEW: com janela de escalonamento e sem eficiência energética (*sleep mode*).

EEABE: com janela de escalonamento e com eficiência energética (*sleep mode*).

5.1. Cenário das simulações

A topologia de rede testada nas simulações foi a NSFNET – Figura 2 – composta de 14 nós e 21 enlaces bidirecionais. O número em cada enlace representa a distância em quilômetros. Além disso, foi definido um conjunto de CDs baseados nas localizações reais da rede de *data centers* do Google², que serão utilizados como origem e destino das requisições BDTs.

No cenário é assumido que a largura de banda para cada enlace é dividida em 320 *slots*, sendo cada *slot* equivalente a 12.5 GHz. Cada nó possui 32 SBVTs, sendo que cada um destes equipamentos tem capacidade para 20 *slots*. A modulação utilizada é a QPSK

¹<https://gitlab.com/lucasrc/ons>

²<https://www.google.com/about/datacenters/inside/locations/index.html>

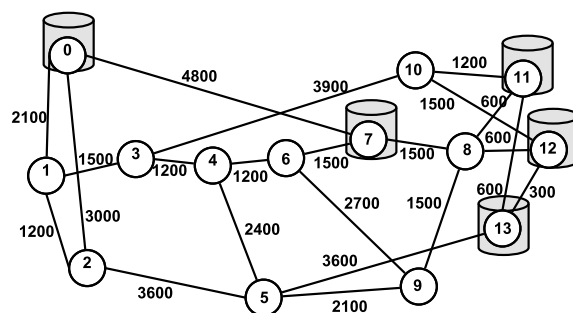


Figura 2. Rede NSFNET

(Quadrature Phase Shift Keying). Foram configuradas 100.000 chamadas dinâmicas e um valor de carga no intervalo de 5 a 125 Erlangs, com passos de 5.

Para as requisições BDTs, definiram-se quantidades de 100, 500, 1000 e 5000 GB para serem transferidas, com *deadlines* em 5, 10, 15 e 20 horas, respectivamente. O tamanho da janela de requisições é normalmente definido pelo operador da rede, assim não houve restrições nos experimentos. O método de replicações independentes foi aplicado gerando intervalos de confiança com confiabilidade de 95%.

As seguintes métricas foram comparadas: taxa de bloqueio das requisições em porcentagem (%), conforme Equação 1, e eficiência energética – medida em $bits/J$ – conforme Equação 7; embora os resultados ilustrados no gráfico da Figura 4 estejam na ordem dos Mb/J . Tanto a taxa de bloqueio como a eficiência energética foram geradas em função da carga de tráfego injetada na rede.

5.2. Avaliação dos Resultados

O EEABE (Algoritmo 1) foi executado na topologia de rede NSFNET (Figura 2) e seus resultados foram comparados com os algoritmos AARSAE e AARSAEW, propostos por [Sousa and Drummond 2017].

O gráfico da Figura 3 ilustra as taxas de bloqueio das requisições para cada nível de carga na rede, mostrando que EEABE e AARSAEW (com menos de 10% até 115 Erlangs) obtiveram taxas de bloqueio bem menores em comparação ao AARSAE (com menos de 10% até 65 Erlangs).

Por outro lado, o gráfico da Figura 4 mostra que mesmo bloqueando na mesma intensidade, a eficiência energética do EEABE é, em média, 8,27% maior com cargas de, até, 40 Erlangs; tanto em relação ao AARSAE quanto ao AARSAEW. Quando a carga da rede aumenta, essa diferença é reduzida mas ainda assim o EEABE se mostra superior com cargas de, até, 60 Erlangs. A taxa de bloqueio do AARASE se eleva quando a carga é superior a 40 Erlangs, entretanto essa mesma elevação linear só ocorre com o EEABE nas cargas maiores que 90 Erlangs. No intervalo com taxas de bloqueio constante (entre 0 e 40 Erlangs), é quando o EEABE mais se destaca, mantendo uma economia energética em mais de 40% (Figura 4). Esse resultado é particularmente interessante porque, considerando-se que a BDT ocorre nos horários com menor pico de tráfego na rede, o EEABE é um contribuidor para manter a eficiência energética.

É importante destacar aqui que, como mostra a Figura 2, os nós definidos como CDs podem assumir o papel de origem, destino ou *bypass*, enquanto que os demais nós

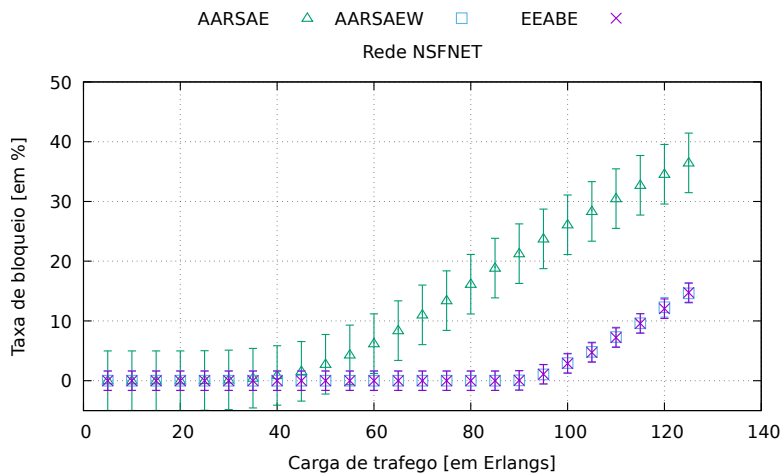


Figura 3. Taxa de Bloqueio das Requisições na rede NSFNET

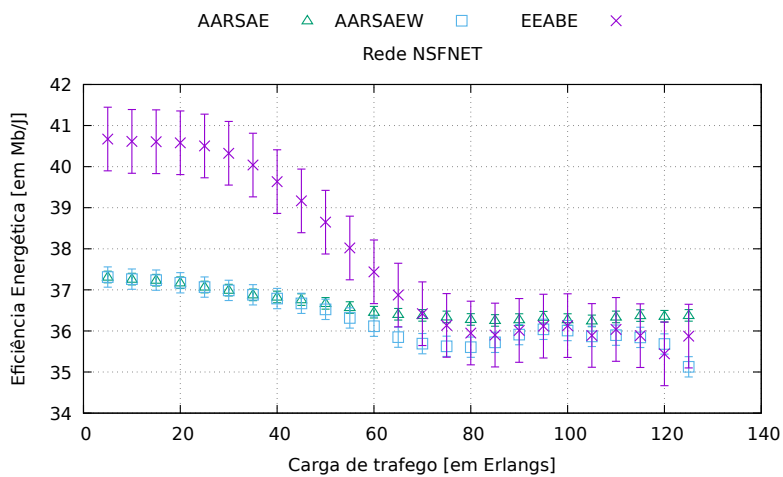


Figura 4. Percentual de Eficiência Energética na rede NSFNET

são utilizados sempre como *bypass*. Essa característica ocorre porque, enquanto várias requisições submetidas são bloqueadas, outras que estavam ativas são finalizadas, desocupando banda nos enlaces da rede. Assim, esse recurso escasso recém desocupado é utilizado pra servir alguma requisição, provocando uma mudança no período da curva.

Com o aumento da carga de tráfego, a rede inicia um processo de congestionamento e é natural que a quantidade de bits transmitidos diminua (e, conseqüentemente, a eficiência energética) afinal, são menores as possibilidades de se formar novos caminhos. Isso justifica a queda brusca da eficiência do EEABE a partir de 30 Erlangs e a manutenção do seu baixo rendimento a partir dos 80 Erlangs.

6. Conclusão

Com o foco em relacionar redes ópticas elásticas, transferências de dados em massa e eficiência energética, este artigo propôs a solução EEABE, um algoritmo que transfere grandes volumes de dados ICD utilizando o *sleep mode* como técnica de eficiência energética e janela de escalonamento para atender as BDTs. Para tal, o EEABE foi experimentado em paralelo com um algoritmo sem janela de escalonamento e

sem *sleep mode* (AARSAE) e um algoritmo com janela de escalonamento e sem *sleep mode* (AARSAEW). Os resultados mostraram que o EEABE, em ambientes com carga de tráfego baixa e média, consegue transferir, aproximadamente, 8% a mais de mega bits por unidade de joule com a taxa de bloqueio praticamente igual à do AARSAEW e inferior perante ao AARSAE de maneira relevante. Porém, com altas cargas de tráfego, a relação Mb/J diminui em detrimento do sobrecarregamento da rede. Mesmo assim, o EEABE se habilita como uma solução energeticamente bastante eficiente (40% de ganhos) nos períodos em que a carga de tráfego da rede se mantiver baixa, o que ocorre comumente em períodos noturnos de tráfego.

Referências

- Afsharlar, P., Deylamsalehi, A., Plante, J. M., Zhao, J., and Vokkarane, V. M. (2017). Routing and Spectrum Assignment with Delayed Allocation in Elastic Optical Networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 9(3):B101–B111.
- Bokhari, M., Sohail, M., Kasi, J. K., and Kasi, A. K. (2016). Performance Analysis of Passive Optical Networks with Energy Saving Through the Integrated Sleep Mode. *Optical Switching and Networking*, 21:16 – 30.
- Charbonneau, N. and Vokkarane, V. M. (2012). A Survey of Advance Reservation Routing and Wavelength Assignment in Wavelength-Routed WDM Networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 14(4):1037–1064.
- Chen, H., Zhao, Y., Zhang, J., Wang, W., and Zhu, R. (2017). Static Routing and Spectrum Assignment for Deadline-Driven Bulk-Data Transfer in Elastic Optical Networks. *IEEE Access*, 5:13645–13653.
- Costa, L. R., de Sousa, L. S., de Oliveira, F. R., da Silva, K. A., Júnior, P. J. S., and Drummond, A. C. (2016). ONS: Optical Network Simulator - WDM/EON.
- Costa, L. R. and Drummond, A. C. (2018). Eficiência Energética com Modelo de Grafo Auxiliar para Redes ópticas Elásticas. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, 36.
- Idzikowski, F., Chiaraviglio, L., Cianfrani, A., Vizcaíno, J. L., Polverini, M., and Ye, Y. (2016). A Survey on Energy-Aware Design and Operation of Core Networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 18(2):1453–1499.
- Ji, S., Liu, S., and Li, B. (2018). Deadline-Aware Scheduling and Routing for Inter-Datacenter Multicast Transfers. In *2018 IEEE International Conference on Cloud Engineering (IC2E)*, pages 124–133.
- Jinno, M., Takara, H., Kozicki, B., Tsukishima, Y., Sone, Y., and Matsuoka, S. (2009). Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies. *IEEE Communications Magazine*, 47(11):66–73.
- Kang, D., Yang, W., Jung, J., and Kim, Y. (2012). Wake Transition Decision Algorithm for Energy Saving in OBS Network with LPI. In *2012 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, pages 527–531.
- Khumalo, P. and Nleya, B. (2018). Sleep-Mode/Traffic Grooming Versus Device Reliability Overview. In *2018 International Conference on Advances in Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD)*, pages 1–5.

- Li, C., Guo, W., Hu, W., and Xia, M. (2015). Energy-Efficient Dynamic Bandwidth Allocation for EPON Networks with Sleep Mode ONUs. *Optical Switching and Networking*, 15:121 – 133.
- Lu, X., Kong, F., Liu, X., Yin, J., Xiang, Q., and Yu, H. (2017). Bulk Savings for Bulk Transfers: Minimizing the Energy-Cost for Geo-Distributed Data Centers. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, PP(99):1–1.
- Ren, W., Hou, L. G. Y. L. J. W. and Yang, Y. (2016). Spectrum and Energy-Efficient Survivable Routing Algorithm in Elastic Optical Network. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 127(20):8795 – 8806.
- Sousa, L. S. and Drummond, A. C. (2017). Provendo Multiplas Transfências de Dados em Massa com Roteamento e Alocação de Espectro Ciente da Aplicação em Redes Ópticas Elásticas. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, 35(1/2017).
- Tafani, D., Kantarci, B., Mouftah, H. T., McArdle, C., and Barry, L. P. (2012). Distributed management of energy-efficient lightpaths for computational grids. In *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 2924–2929.
- Van, D. P., Fiorani, M., Wosinska, L., and Chen, J. (2017). Adaptive Open-Shop Scheduling for Optical Interconnection Networks. *Journal of Lightwave Technology*, 35(13):2503–2513.
- Wong, S., Valcarenghi, L., Yen, S., Campelo, D. R., Yamashita, S., and Kazovsky, L. (2009). Sleep Mode for Energy Saving PONs: Advantages and Drawbacks. In *2009 IEEE Globecom Workshops*, pages 1–6.
- Yen, J. Y. (1971). Finding the k Shortest Loopless Paths in a Network. *management Science*, 17(11):712–716.