

Adoção de roteamento por múltiplos caminhos e agregação de tráfego em redes WDM para o consumo eficiente de energia

Juliana de Santi, Nelson L. S. da Fonseca

¹Instituto de Computação – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Caixa Postal 6167 – 13084-971 – Campinas – SP – Brasil

{santi,nfonseca}@ic.unicamp.br

Abstract. *This paper investigates the use of multipath grooming to save energy in Wavelength Division Multiplexing (WDM) networks by splitting the bandwidth demand of requests among several paths and aggregating them with already established lightpaths. Two algorithms are proposed which employ an auxiliary graph which edge weights represent the energy consumed by all the operations related to the optical transmission in a lightpath to provide the bandwidth requested. Both algorithms select a subset of different sets of k lightpaths which residual bandwidth surpasses minimally the demanded bandwidth and which energy consumption is minimal. These two algorithms represent the choice of criteria between energy consumption only or both energy and bandwidth. It is shown that the algorithm which considers both energy and bandwidth employs a lower number of lightpaths reducing the energy consumption and blocking rate.*

Resumo. *Neste trabalho, investiga-se a utilização de agregação de tráfego em múltiplos caminhos ópticos para reduzir o consumo de energia em redes Wavelength Division Multiplexing (WDM). Para tal, a banda passante solicitada é dividida e agregada em caminhos já existentes. São propostos dois algoritmos que usam um grafo auxiliar no qual os pesos das arestas representam a energia consumida por todas as operações envolvidas na transmissão em um caminho óptico. Os algoritmos selecionam um subconjunto de k potenciais caminhos ópticos para atender a conexão solicitada com consumo mínimo de energia. Os algoritmos representam a escolha entre consumo de energia e, consumo de energia e banda residual. Os resultados indicam que o algoritmo que considera tanto energia quanto banda residual como critério de escolha utiliza um número menor de caminhos ópticos, o que reduz tanto o consumo de energia quanto o bloqueio de conexões.*

1. Introdução

O consumo de energia de infraestrutura de redes tem aumentado devido à expansão do acesso banda larga e aos novos serviços oferecidos. De acordo com o estudo apresentado em [Bolla et al. 2011], o crescimento do volume de tráfego na Internet segue a lei de Moore, dobrando a cada 18 meses. Por sua vez, as tecnologias aprimoram sua eficiência energética por um fator de 1.65 a cada 18 meses, segundo a lei de Dennard. Há, assim, um aumento constante no consumo de energia nas redes de comunicações, que representa, hoje, entre 2% e 10% do consumo global de energia. Tal crescimento tem motivado aos

provedores a operar suas redes com maior eficiência energética sem, entretanto, comprometer os serviços oferecidos.

Por utilizar a capacidade residual dos caminhos ópticos já estabelecidos, a agregação de tráfego é uma técnica que potencialmente pode reduzir o consumo de energia pois evita o consumo inerente à alocação de novos caminhos ópticos. Pode-se, também, potencializar a agregação de tráfego através da divisão e transmissão de uma conexão em múltiplos caminhos (*multipath*), caso a soma da banda residual destes caminhos seja pelo menos igual a banda requisitada, ou seja, a agregação dinâmica de tráfego e roteamento em múltiplas rotas podem ser empregados conjuntamente para servir tanto aplicações que demandam banda passante maior do que a capacidade de um comprimento de onda (conexões *suprawavelegth*) quanto aplicações que demandam banda passante menor do que a capacidade de um comprimento de onda (conexões *subwavelegth*) [de Santi et al. 2011, de Santi et al. 2012].

Neste trabalho, investiga-se a utilização de agregação de tráfego em múltiplos caminhos ópticos para reduzir o consumo de energia na operação da Internet. Para tal, a banda passante demandada é dividida e transmitida (agregada) em caminhos ópticos já existentes. São propostos dois algoritmos que empregam grafo auxiliar cujos pesos das arestas representam a energia consumida por todas as operações envolvidas na transmissão em um caminho óptico. Os algoritmos selecionam um conjunto de k potenciais caminhos ópticos (arestas) para atender a conexões solicitada. Em um dos algoritmos, os k caminhos escolhidos são aqueles com o menor consumo de energia enquanto no outro k caminhos com banda residual total disponível pelo menos igual a banda da conexão solicitada. Os dois algoritmos selecionam um subconjunto dos k caminhos ópticos com capacidade residual mínima para atender a demanda tal que o consumo de energia seja mínimo. Os critérios adotados pelos algoritmos representam a escolha entre consumo de energia e, consumo de energia e banda residual. Os resultados indicam que o algoritmo que considera tanto energia quanto banda residual como critério de escolha utiliza um número menor de caminhos ópticos, o que reduz tanto o consumo de energia quanto o bloqueio de conexões.

Foram realizadas simulações utilizando cenários realistas compostos por *Optical Cross-Connect* (OXC) com capacidade restrita de agregação. Os resultados obtidos mostram que os algoritmos de agregação em múltiplos caminhos cientes do consumo de energia são capazes de reduzir o consumo de energia em redes WDM, além de obterem probabilidade de bloqueio inferiores as obtidas quando a agregação utiliza um único caminho (*singlepath*).

Este trabalho é organizado da seguinte forma. A seção 2 apresenta os trabalhos correlatos. A seção 3 descreve o modelo de energia utilizado. A seção 4 introduz os algoritmos propostos para agregação *multipath* ciente do consumo de energia. A seção 5 descreve os resultados da avaliação dos algoritmos propostos. Por fim, a seção 6 apresenta as conclusões.

2. Trabalhos Correlatos

Motivado por razões econômicas e ambientais, a operação de redes que privilegiam a redução do consumo de energia tem atraído a atenção da comunidade científica. Em [Bianzino et al. 2012], são apontadas as potenciais direções para computação verde em

redes de computadores. Em [Zhang et al. 2010b] e [Kilper et al. 2012], são descritas abordagens para a economia de energia em redes ópticas.

Em [Xia et al. 2011], apresenta-se um modelo que captura o consumo de energia em redes WDM. Em [Yetginer and Rouskas 2009], introduz-se uma solução baseada em Programação Linear Inteira (PLI) para o problema de agregação com consumo eficiente de energia em cenário estático.

Em [Scaraficci et al. 2012], investiga-se o problema de agregação dinâmica de fluxos que leva em consideração o consumo de energia em redes WDM. Nesse estudo, considera-se um grafo auxiliar reduzido, o qual limita o espaço de soluções e captura o consumo de energia do provisionamento através dos caminhos ópticos.

A minimização do consumo de energia em redes ópticas foi, também, investigado quando se tem o conhecimento da duração das conexões [Zhang et al. 2010a, Chen and Jaekel 2012]. Em [Farahmand et al. 2010], descreve-se um algoritmo baseado em classes de serviço que considera o consumo de energia.

Em [Lee and Reddy 2012], apresenta-se um algoritmo *multipath* para economia de energia para uma rede genérica. A ideia do estudo é projetar a topologia usando árvores de *Steiner* e empregar soluções *multipath* e *singlepath* derivadas de problema *bin packing*.

Os algoritmos propostos no presente trabalho, diferentemente do estudo em [Lee and Reddy 2012], escolhem os múltiplos caminhos que atenderão a conexão solicitada, considerando a energia consumida nas operações relacionadas à transmissão de dados nesses caminhos. Ademais, adota-se um cenário no qual as conexões chegam e partem dinamicamente.

3. Modelo de Consumo de Energia

O modelo de consumo de energia utilizado no presente trabalho é baseado no modelo introduzido em [Xia et al. 2011]. De acordo com este modelo, o consumo de energia em uma rede IP/MPLS sobre WDM é calculado somando-se a energia consumida pelo conjunto de operações relacionadas ao transporte de dados em uma rede. As operações consideradas são: comutação eletrônica (CE), comutação óptica (CO), conversão eletro-óptica (EO), conversão óptico-elétrico (OE), transponder transmissor (TX), transponder receptor (RX) e amplificadores de sinal (AM). Para cada operação, a energia consumida é dada por:

$$P = P_O + P_T \times t \quad (1)$$

onde P_O e P_T são, respectivamente, os parâmetros independente e dependente de tráfego das operações, e t representa o volume de tráfego transportado.

Para ilustrar o consumo de energia no estabelecimento de um caminho óptico, considere o exemplo da figura 1. Nesta figura, há quatro pares de roteadores IP/MPLS e OXC (*Optical Cross-Connect*). Existem, também, dois caminhos ópticos $L1$ e $L2$ nas rotas $A \rightarrow A' \rightarrow B' \rightarrow C' \rightarrow C$ e $C \rightarrow C' \rightarrow D' \rightarrow D$, respectivamente; e dois fluxos IP/MPLS $F1$ e $F2$, de A para C e de A para D , respectivamente. O fluxo $F1$ é transmitido através do caminho $L1$ enquanto o fluxo $F2$ é transmitido de A para C através do canal óptico $L1$ e de C para D através do caminho óptico $L2$.

Sem perda de generalidade, na Equação 1, os termos independente e depen-

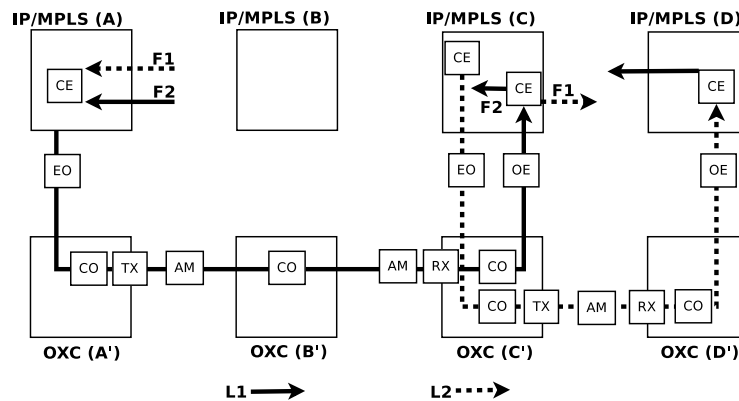


Figura 1. Exemplo de consumo de energia para caminhos ópticos e fluxos IP/MPLS [Scaraficci et al. 2012]

dente de tráfego podem ser associados ao estabelecimento de caminhos ópticos e aos fluxos transportados neste caminhos, respectivamente. Assim, a energia consumida no caminho óptico $L1$ pode ser calculada somando-se cada termo independente de tráfego (P_O) para cada operação envolvida na transmissão no caminho $L1$. Estas operações são comutação eletrônica em A , conversão elétrico-óptica de A para A' , comutação óptica e transmissão transponder em A' , amplificação de sinal de A' para B' , comutação óptica em B' , amplificação de sinal de B' para C' , recepção transponder e comutação óptica em C' , conversão óptico-eletrônica de C' para C e comutação eletrônica em C .

A energia consumida no caminho óptico $L2$ pode ser calculada como a soma de: comutação eletrônica em C , conversão elétrico-óptica de C para C' , comutação óptica e transmissão transponder em C' , amplificação de sinal de C' para D' , recepção transponder e comutação óptica em D' , conversão óptico-elétrica de D' para D e comutação eletrônica em D .

O consumo de energia do fluxo $F1$ pode ser calculado através das mesmas operações usadas no cálculo do consumo de energia do caminho óptico $L1$, e pelo uso do termo dependente de tráfego das operações de consumo de energia ($P_T \times t$, onde t é banda passante para o fluxo $F1$).

O consumo de energia do fluxo $F2$ pode ser calculado através das mesmas operações consideradas no cálculo do consumo de energia dos caminhos ópticos $L1$ e $L2$ menos uma operação de comutação eletrônica. A subtração é necessária uma vez que tanto o caminho óptico $L1$ quanto o caminho óptico $L2$ consideram uma operação de comutação eletrônica no nó C , e, na realidade, há somente uma operação de comutação eletrônica no nó C que é consequência da conversão eletrônica do caminho óptico $L1$ para o caminho óptico $L2$. O termo dependente de tráfego das operações de consumo de energia ($P_T \times t$, onde t é a banda passante para o fluxo $F2$) é calculado da mesma forma do que para o fluxo $F1$.

Nota-se que quanto menor a carga de tráfego em um caminho óptico, maior é o impacto do componente independente de tráfego (*overhead*). Desta forma, uma maior eficiência pode ser obtida através da agregação de fluxos IP/MPLS em caminhos já estabelecidos. Entretanto, a agregação de tráfego em caminhos ópticos *multi-hop* pode demandar um grande número de operações de comutação eletrônica e de conversão de

signal, e, conseqüentemente, pode haver um maior consumo de energia do que a energia necessária para estabelecer um novo caminho *single-hop* para transmitir o tráfego.

4. Algoritmos para economia de energia via agregação multi-caminho

Os algoritmos propostos nesta seção definem como os múltiplos caminhos ópticos são escolhidos para atender as solicitações de conexão. Uma requisição para estabelecimento de conexão r é definida como $r = (s, d, b)$, onde s é o nó fonte, d é o nó destino, e b é a banda passante solicitada.

Requisições que não podem ser atendidas em um único caminho óptico, devido a insuficiência de banda passante, são divididas e transmitidas através de múltiplos caminhos ópticos, se a soma da banda residual nestes caminhos é pelo menos igual a banda passante requisitada b .

Os algoritmos propostos, denominados Algoritmo para Agregação Multi-caminho Ciente do Consumo de Energia (AME) e Algoritmo para Agregação Multi-caminho Ciente do Consumo de Energia e da Banda Residual (AMEB), capitalizam na divisão de demandas em múltiplos caminhos para tentar aumentar o número de conexões aceitas, bem como reduzir o estabelecimento de novos caminhos ópticos.

Os algoritmos consideram um grafo auxiliar G para representar os caminhos existentes e os caminhos potencialmente alocáveis. São selecionados k potenciais caminhos ópticos para o provisionamento das demandas solicitadas. O algoritmo AME seleciona k caminhos ópticos que tenham o menor consumo de energia, enquanto que o algoritmo AMEB seleciona um conjunto de k caminhos ópticos cuja soma de banda residual é pelo menos a banda passante solicitada, e que tenham o menor consumo de energia. k é o número máximo de caminhos ópticos que podem ser alocados para atender a conexão requisitada. É selecionado um subconjunto do conjunto com k caminhos que tenha banda residual suficiente para provisionar a conexão requisitada.

4.1. Algoritmos para agregação multi-caminho

Os algoritmos propostos são executados na chegada de cada solicitação para estabelecimento de conexão. No Algoritmo para Agregação Multi-caminho Ciente do Consumo de Energia (AME) (Figura 1), caso existam caminhos ópticos com banda passante suficiente para atender a demanda solicitada, o caminho óptico com o menor consumo de energia é selecionado (Linhas 1-3)

Caso não exista caminho único com tal propriedade, a conexão é provisionada utilizando-se um subconjunto de caminhos ópticos do conjunto de k caminhos que tenham o menor consumo de energia e cuja banda passante residual seja pelo menos igual a banda passante solicitada.

No primeiro passo, o algoritmo AME constrói o grafo auxiliar (Linha 5). Para cada aresta no grafo, um custo é associado para representar o consumo de energia (Linha 6). Os k caminhos com o menor consumo de energia são escolhidos (Line 7). Então, todas as possíveis combinações de caminhos ópticos são enumeradas (Linha 8). Por fim, o subconjunto de caminhos ópticos com o menor custo e que tem banda passante suficiente para atender a demanda solicitada é selecionado (Line 9).

Algoritmo 1 Algoritmo para Agregação Multi-caminho Ciente do Consumo de Energia (AME)

Entrada: Demanda $r(s, d, b)$ solicitando b unidades de banda passante entre (s, d)

Saída: Conjunto de caminhos ópticos entre s e d para agregar r

- 1: **if** Existe um conjunto de caminhos ópticos $l \mid \forall l B(l) \geq b$ **then**
 - 2: Construa G com o conjunto de l
 - 3: Retorne l com o menor custo para agregar r
 - 4: **else**
 - 5: Construa o grafo auxiliar com $l \mid \forall l B(l) > 0$
 - 6: Calcule o custo dos caminhos candidatos l usando Eq. 1
 - 7: Selecione os k caminhos com o menor consumo de energia
 - 8: Enumere todas as possíveis combinações de subconjuntos $[C_i^k]$
 - 9: Retorne o subconjunto de caminhos em $[C_i^k]$ com o menor custo tal que $\sum_{j=1}^i B(l_j)$ é mínimo
 - 10: **end if**
-

O Algoritmo para Agregação Multi-Caminho Ciente do Consumo de Energia e da Banda Residual (AMEB) difere do algoritmo AME pela Linha 5 por:

- 5: Construa o grafo auxiliar com $l \mid \forall l B(l) \geq b/k$

Assim, no algoritmo AMEB, o grafo auxiliar contém somente arestas que tem pelo menos b/k banda passante disponível. A ideia é selecionar um conjunto de caminhos ópticos que satisfaça a banda solicitada. Da mesma forma que no algoritmo AME, todas as combinações de i caminhos ópticos $[C_i^k]$ são enumeradas e o subconjunto de caminhos com o menor consumo de energia e com banda passante suficiente para atender a demanda é escolhido.

4.1.1. Complexidade

A construção do grafo auxiliar envolve $O(N^2)$ operações, onde N é o número de nós na rede (Linhas 2 e 5). A computação do custo na Linha 6 é aplicada para cada caminho/aresta no grafo, logo sua complexidade é $O(E)$. Para definir o caminho óptico com o menor custo, o algoritmo de *Dijkstra* requer $O(N^2)$ operações (Linha 3). A seleção dos caminhos (Linha 7) requer k execuções para definir os k caminhos ópticos com o menor consumo de energia, então há $k \times O(N^2)$ operações. Desta forma, a complexidade dos algoritmos é $O(N^2)$.

4.2. Algoritmo para agregação *singlepath*

Para avaliar os benefícios da utilização dos algoritmos de agregação multi-caminho propostos, um algoritmo para agregação *singlepath* ciente do consumo de energia foi definido (Figura 2).

Na chegada de uma requisição para estabelecimento de conexão $r = (s, d, b)$, o grafo auxiliar G é construído incluindo caminhos ópticos l com capacidade residual ($B(l)$) maior ou igual a banda passante solicitada b (Linha 1). Na Linha 2, o custo de cada

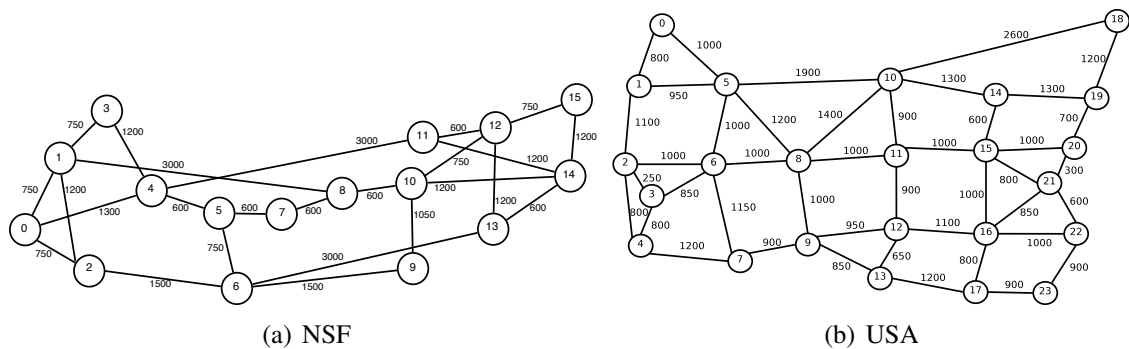


Figura 2. Topologias

aresta em G é o consumo de energia da utilização de um único caminho óptico. Então, o caminho óptico l com o menor consumo de energia é escolhido (Linha 3).

Algoritmo 2 Algoritmo para Agregação *Singlepath* Ciente do Consumo de Energia

Entrada: Demanda $r(s, d, b)$ solicitando b unidades de banda passante entre (s, d)

Saída: Um caminho óptico entre s e d para agregar r

- 1: Construa o grafo auxiliar $\forall l \in G, B(l) \geq b$
 - 2: Calcule o custo dos caminhos candidatos l de acordo com a Eq. 1
 - 3: Escolha o caminho óptico l com o menor consumo de energia
-

5. Resultados Numéricos

Para avaliar o desempenho dos algoritmos propostos foram realizadas simulações. O algoritmo de RWA utilizado foi roteamento fixo-alternado com 5 rotas alternativas, e a política de alocação de comprimento de onda utilizada é a *First-Fit*, comumente utilizada na literatura.

As simulações foram realizadas utilizando o simulador WDMSim [Drummond 2013] e o método de replicação independente foi empregado para gerar intervalos de confiança com nível de confiança de 95%. Estes intervalos são apresentados nas figuras, mas por serem muito pequenos confunde-se com os pontos plotados do valor médio do intervalo. Para cada simulação, foram utilizadas 1 milhão de pedidos de estabelecimento de conexão.

As topologias utilizadas nas simulações foram a topologia NSF, com 16 nós e 25 enlaces bidirecionais (Figura 2(a)) e a topologia USA, com 24 nós e 43 enlaces bidirecionais (Figura 2(b)). Os nós utilizados são *Optical Cross-Connect* (OXC)s com capacidade restrita de agregação e sem capacidade de conversão, possuindo 32 pares (*input, output*) de portas de agregação. Cada fibra óptica comporta 16 comprimentos de onda e cada comprimento de onda tem uma capacidade de transmissão $OC-192$, i.e., 10 Gbps. O número de amplificadores em cada enlace é definido por $\lceil S_e/801 \rceil + 2$ [Shen and Tucker June], onde S_e é o comprimento do enlace e em quilômetros.

A taxa de chegada de chamadas e o tempo de duração das mesmas seguem, respectivamente, a distribuição de Poisson e a distribuição exponencial negativa. A média para o tempo de duração da conexão é de uma unidade de tempo. As requisições de co-

nexões são uniformemente distribuídas entre todos os pares de nós com probabilidade: $OC-1:20$, $OC-3:10$, $OC-12:10$, $OC-48:4$ e $OC-192:1$.

O valor dos parâmetros para computação do consumo de energia das operações é definido conforme segue: $P_{AM} = 0.07$, $P_{RX} = 0.5$, $P_{TX} = 10$, $P_{OE} = 1$, $P_{EO} = 1.3$, $P_{CO} = 9.2$ e $P_{CE} = 18.4$ para um comprimento de onda de capacidade $OC-192$ [Xia et al. 2011]. Todos os valores são adimensionais. O *overhead* é definido como a razão entre a componente de consumo de energia independente de tráfego sobre a componente dependente de tráfego $\frac{P_O}{P_T}$, onde P_T é a energia consumida por um comprimento de onda completo, i.e., $OC-192$ e não pelo tráfego transportado [Xia et al. 2011]. O valor definido para o *overhead* foi 0.2. Os valores de todos os parâmetros na equação de consumo de energia (Eq. 1) foram normalizados pela capacidade de um comprimento de onda, de forma que o consumo total de energia da rede passa ser calculado considerando-se a carga nos caminhos ópticos. Variando-se a carga da rede, obtêm-se diferentes taxas de chegada para cada tipo de conexão, o cálculo dessas taxas pode ser realizado utilizando-se a equação:

$$A = R \times h \times (b/\lambda) \quad (2)$$

onde R é a taxa média de chegada; h é o tempo de duração da chamada; b é a banda passante requisitada normalizada pela taxa $\lambda(OC-192)$.

As métricas empregadas para a avaliação dos algoritmos propostos são: o consumo de energia por banda passante (*energy consumption per bandwidth* - ECB), a taxa de bloqueio de banda (*bandwidth blocking ratio* - BBR), o número de conexões transmitidas através de múltiplos caminhos, o número médio de caminhos ópticos usados por conexão atendida e o índice de justiça. O consumo de energia por banda passante é dado pela razão entre a energia total consumida pela rede e pela quantidade de banda aceita. A taxa de bloqueio de banda é a percentagem da quantidade de banda bloqueada sobre o total de banda requerida por todas as conexões.

A Figura 3 apresenta o número de conexões transmitidas utilizando-se múltiplos caminhos ópticos em função da carga para a topologia NSF. Os valores apresentados foram gerados com a utilização dos algoritmos AME e AMEB para $k = 5$, $k = 10$ e $k = 15$, onde k é o número máximo de caminhos ópticos que podem ser utilizados para atender uma conexão solicitada. Múltiplos caminhos ópticos são utilizados quando a banda disponível em um único caminho é insuficiente para atender uma conexão solicitada. Conforme esperado, o aumento no valor de k aumenta o número de conexões aceitas dado o aumento da banda residual. Ademais, para todos os valores de k utilizados, o algoritmo AMEB atende um número maior de conexões, dado que este garante a priori a existência de banda residual capaz de prover a banda passante demandada. Ao se adotar somente consumo de energia como critério para seleção dos k caminhos, o algoritmo AME tende a escolher caminhos com menor banda residual, e, conseqüentemente, aumenta-se a chance de bloqueio de conexões. De acordo com a Equação 1, quanto maior é a carga em um caminho óptico menor é o impacto da componente independente de tráfego no custo de utilização deste caminho.

A Figura 4 apresenta o consumo de energia por banda passante (ECB) para diferentes valores de k em função da carga para a topologia NSF. Os valores do consumo de energia por banda passante gerados pelos algoritmos propostos refletem a capacidade de provisionamento dos mesmos (Figura 3). Para o algoritmo AME, a variação de k

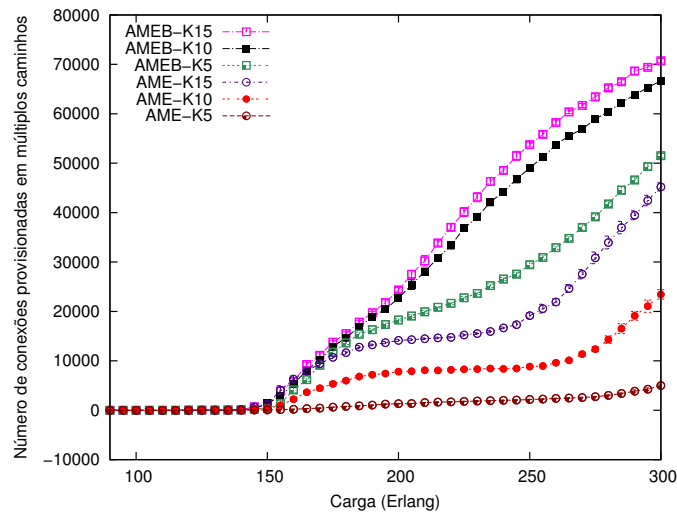


Figura 3. Número de conexões provisionadas em múltiplos caminhos vs carga na rede (NSF)

leva a uma grande variação no consumo de energia por banda passante, uma vez que ao se aumentar o número de caminhos, aumenta-se, também, a soma de banda residual e a tendência de se escolher caminhos com menor quantidade de banda diminui. Por outro lado, para valores de $k = 10$ e $k = 15$, a banda residual adicional não tem impacto significativo sobre o consumo de energia para o algoritmo AMEB. O critério que conjuga consumo de energia e banda disponível para a escolha dos k caminhos produz vantagem significativa para pequenos valores de k . Considerando-se estas observações, os resultados para os algoritmos AME e AMEB apresentados neste artigo tem o valor de k igual a 10.

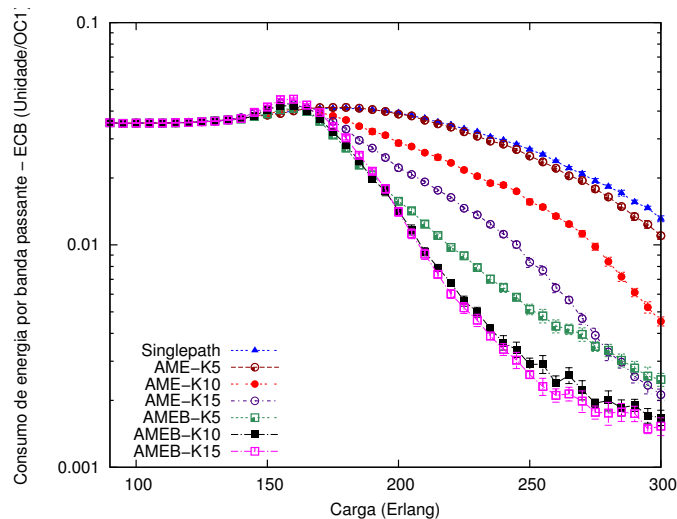


Figura 4. ECB para diferentes valores de k vs carga na rede (NSF)

A Figura 5 apresenta o consumo de energia por banda passante em função da

carga para a topologia NSF. Para valores de carga menores do que 145 *Erlangs*, todos os algoritmos consomem a mesma quantidade de energia, dado que a maioria das soluções utiliza um único caminho para atender as demandas solicitadas. Com o aumento da carga da rede, o algoritmo *singlepath* torna-se menos eficiente do que os demais algoritmos. Ao se comparar os dois algoritmos *multipath*, verifica-se que a inclusão de banda residual no critério de seleção do algoritmo AMEB leva a uma redução considerável no consumo de energia, pois há uma tendência de se utilizar um menor número de caminhos ópticos dado que estes tipicamente tem maior banda residual do que os caminhos selecionados pelo algoritmo AME. A redução do número de caminhos ópticos para o provisionamento da conexão implica na redução das operações necessárias para a transmissão e, consequentemente, na redução do consumo total de energia.

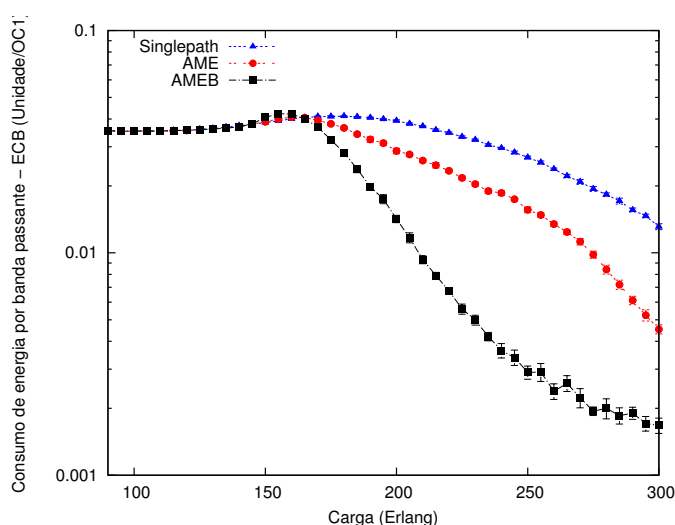


Figura 5. ECB vs carga na rede (NSF)

A Figura 6 apresenta os valores de BBR em função da carga para a topologia NSF. O algoritmo AME gera valores de BBR menores do que aqueles produzidos pelo algoritmo *singlepath*, dado que o roteamento *multipath* permite acomodar a demanda de banda passante de forma flexível. Sob cargas menores do que 220 *Erlangs*, o algoritmo AMEB é capaz de atender uma quantidade de requisições muito maior do que o algoritmo AME, uma vez que o conjunto com k caminhos selecionados por AME não necessariamente tem a banda residual suficiente para atender a banda passante solicitada e, consequentemente, um número elevado de solicitações de conexão pode ser rejeitado.

Na Figura 7, apresenta-se o número médio de caminhos ópticos usados por conexão provisionada em função da carga para a topologia NSF. A utilização de múltiplos caminhos para atender as demandas solicitadas inicia por volta de 100 *Erlangs*, e sob esta carga, iniciam-se os bloqueios de conexões gerados pelo algoritmo *singlepath*. O número de caminhos utilizados tende a estabilizar depois de 130 *Erlangs*, e depois deste valor de carga o algoritmo AME tem uma utilização de caminhos 50% maior do que a do algoritmo AMEB.

A Figura 8 apresenta o índice de justiça de Jain da BBR experimentada pelos pares origem-destino em função da carga para topologia NSF. O índice de justiça é uma métrica

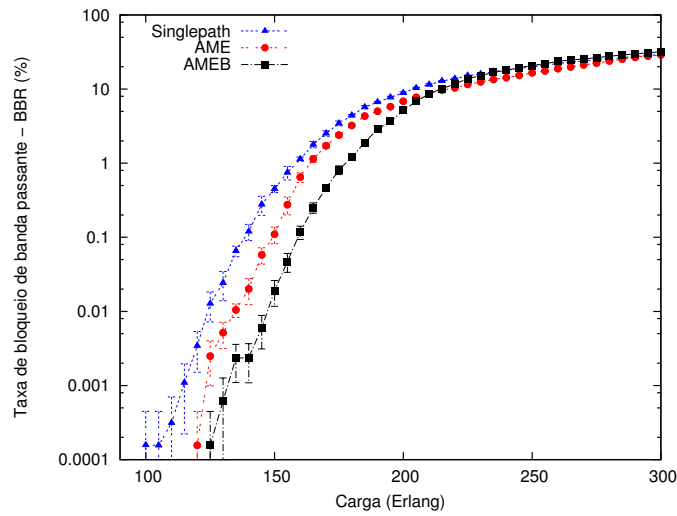


Figura 6. BBR vs carga na rede (NSF)

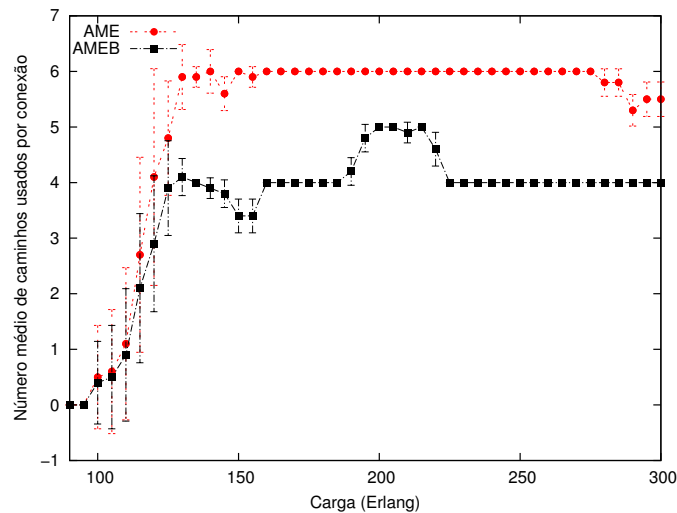


Figura 7. Número médio de caminhos ópticos usados por conexão aprovacionada vs carga na rede (NSF)

cujos valores variam no intervalo (0, 1) e indica o nível de balanceamento de um conjunto de valores. Um algoritmo justo deve ser capaz de gerar valores de BBR similares para todos os pares origem-destino, o que implica em altos valores do índice de justiça. Para cargas menores do que 175 *Erlangs*, todos os algoritmos geraram baixos índices de justiça devido ao número elevado de pares origem-destino com valores nulos de BBR. Conforme a carga aumenta, o algoritmo AMEB produz os maiores valores de índice de justiça como resultado da melhor distribuição do bloqueio entre os pares origem-destino.

A Figura 9 apresenta o consumo de energia por banda passante (ECB) em função da carga para a topologia USA. A topologia USA apresenta um número maior de rotas disponíveis entre pares origem-destino quando comparada com a topologia NSF e, assim,

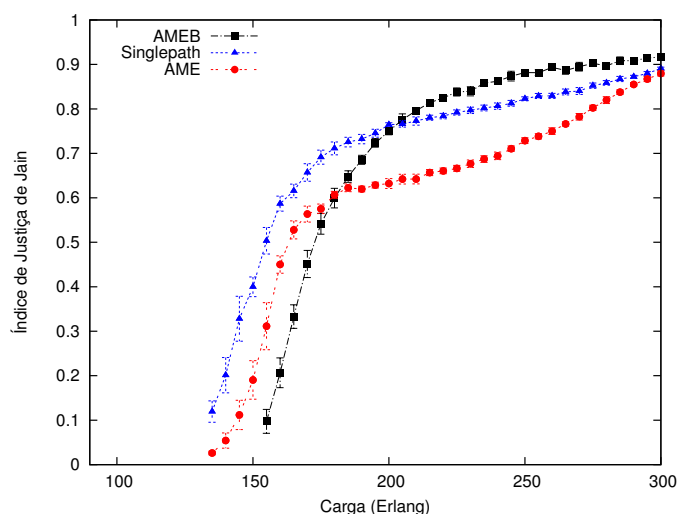


Figura 8. Índice de justiça de Jain *vs* carga na rede (NSF)

a possibilidade de atender uma requisição por um único caminho é maior do que no caso da topologia NSF. Para valores de carga menores do que 190 *Erlangs*, todos os algoritmos apresentam o mesmo consumo de energia, uma vez que a maioria das soluções utiliza um único caminho para atender as demandas solicitadas. Com o aumento da carga, os algoritmos AME e AMEB apresentam maior eficiência do que o algoritmo *singlepath*, uma vez que ao usarem caminhos já estabelecidos, provisionam-se um número maior de conexões. Comparando-se os dois algoritmos *multipath*, verifica-se, novamente, que a combinação de consumo de energia e banda residual do algoritmo AMEB é um critério decisivo para a redução do consumo de energia, pois permite que um menor número de caminhos ópticos seja empregado para atender a banda passante solicitada. Ao se reduzir o número de caminhos ópticos para o provisionamento da conexão, reduz-se, também, as operações necessárias para a transmissão e, como consequência, o consumo total de energia é minimizado.

A Figura 10 apresenta os valores de BBR em função da carga para a topologia USA. Os algoritmos que utilizam múltiplos caminhos ópticos para atender conexões geram valores de BBR menores do que aqueles produzidos pelo algoritmo *singlepath*. A maior disponibilidade de rotas na topologia USA dá aos algoritmos AME e AMEB a possibilidade de caminhos alternativos para a divisão e transmissão da conexão e, consequentemente, gargalos são contornados com maior facilidade do que no algoritmo *singlepath*, o que permite o provisionamento de um número maior de conexões.

Devido a limitação de espaço, os resultados das demais métricas obtidos para a topologia USA serão omitidas neste trabalho. Os valores destas métricas levam as mesmas conclusões obtidas para a topologia NSF.

6. Conclusão

Os algoritmos propostos neste artigo reduzem o consumo de energia quando comparados ao algoritmo que utiliza um único caminho, indicando que o uso de roteamento multi-caminho ciente do consumo de energia é uma abordagem promissora para agregação

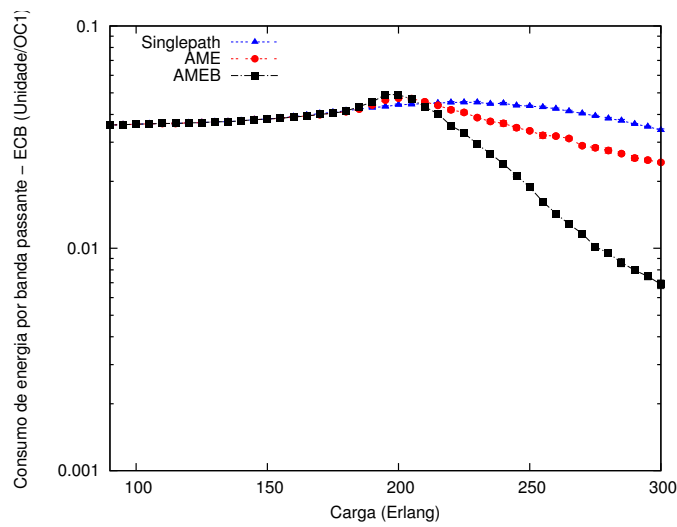


Figura 9. ECB vs carga na rede (USA)

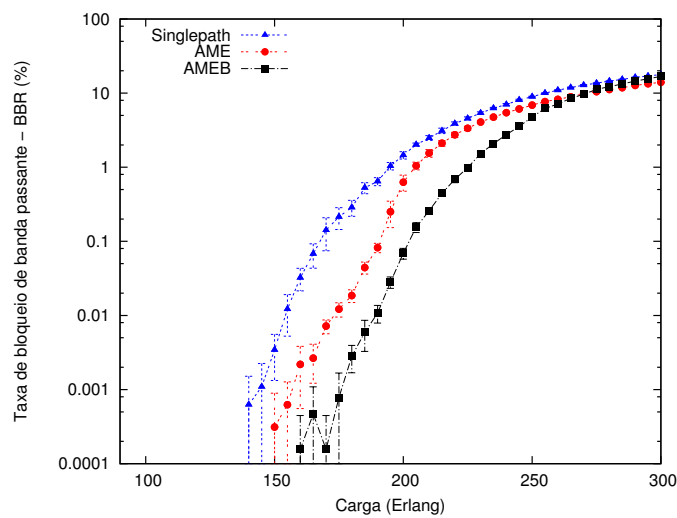


Figura 10. BBR vs carga na rede (USA)

dinâmica de tráfego em redes WDM. Ademais, o requisito de banda residual mínima do algoritmo AMEB leva a redução do consumo de energia e aumenta a aceitação de conexões quando comparado com o algoritmo AME, o que resulta na utilização de um número menor de caminhos ópticos por conexão atendida. O índice de justiça gerado com o algoritmo AMEB é superior aqueles gerados pelos outros dois algoritmos.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES e pelo CNPq sob o processo número 141246/2009-0.

Referências

- Bianzino, A., Chaudet, C., Rossi, D., and Rougier, J.-L. (2012). A survey of green networking research. *IEEE Commun. Surveys Tutorials*, 14(1):3–20.
- Bolla, R., Davoli, F., Bruschi, R., Christensen, K., Cucchietti, F., and Singh, S. (2011). The potential impact of green technologies in next-generation wireline networks: Is there room for energy saving optimization? *IEEE Commun. Magazine*, 49(8):80–86.
- Chen, Y. and Jaekel, A. (2012). Energy aware resource allocation based on demand bandwidth and duration. *Elsevier - Procedia Computer Science*, 10(0):998 – 1003.
- de Santi, J., Drummond, A., and da Fonseca, N. (2011). Roteamento em múltiplas rotas com agregação dinâmica de fluxos com duração conhecida em redes wdm. In *X CSBC Wperformance*, volume 1, pages 1–14.
- de Santi, J., Drummond, A., da Fonseca, N., Chen, X., and Jukan, A. (2012). Leveraging multipath routing and traffic grooming for an efficient load balancing in optical networks. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 2989–2993.
- Drummond, A. C. (2013). WDMsim - optical WDM networks simulator. <http://www.lrc.ic.unicamp.br/wdmsim>.
- Farahmand, F., Hasan, M., Cerutti, I., Jue, J., and Rodrigues, J. (2010). Differentiated energy savings in optical networks with grooming capabilities. In *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–5.
- Kilper, D., Guan, K., Hinton, K., and Ayre, R. (2012). Energy challenges in current and future optical transmission networks. *Proceedings of the IEEE*, 100(5):1168–1187.
- Lee, Y. O. and Reddy, A. L. N. (2012). Multipath routing for reducing network energy. *IEEE Greencom Conference - <http://www.ieee-greencom.org/>*.
- Scaraficci, R., da Fonseca, N., and Salvador, M. (2012). Algorithm for energy efficient lightpath establishment in wdm networks. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1454–1459.
- Shen, G. and Tucker, R. (June). Energy-minimized design for ip over wdm networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Commun. and Networking*, 1(1):176–186.
- Xia, M., Tornatore, M., Zhang, Y., Chowdhury, P., Martel, C., and Mukherjee, B. (2011). Green provisioning for optical wdm networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 17(2):437–445.
- Yetginer, E. and Rouskas, G. (2009). Power efficient traffic grooming in optical wdm networks. In *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–6.
- Zhang, S., Shen, D., and Chan, C.-K. (2010a). Energy efficient time-aware traffic grooming in wavelength routing networks. In *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–5.
- Zhang, Y., Chowdhury, P., Tornatore, M., and Mukherjee, B. (2010b). Energy efficiency in telecom optical networks. *IEEE Commun. Surveys Tutorials*, 12(4):441–458.