

Roteamento ciente da capacidade e consumo energético em redes de satélites LEO

Francisco Enedelson Passos da Maceno, Edjair de Sousa Mota e Celso Barbosa Carvalho

Resumo—Este artigo apresenta uma métrica de roteamento para redes de satélites de órbita baixa (Low Earth Orbit - LEO), de forma que permita aumentar a demanda de tráfego atendida, observando o consumo energético das baterias dos satélites que estão na área de eclipse. Nossa proposta aproveita o movimento dos satélites em suas órbitas para favorecer o tráfego de dados entre satélites que estão expostos à luz solar, em oposição aos satélites que estão na área de eclipse, a fim de reduzir a profundidade de descarga das baterias. Além disso, também são observadas as capacidades dos enlaces entre os satélites adjacentes, com o objetivo de evitar congestionamentos na rede, aumentando o escoamento de tráfego de dados.

Os resultados das simulações demonstraram aumento de demanda em 14%, na situação com 100 fontes com taxa de 1,5Mbps, quando comparado a métrica LASER [1], sem aumentar o consumo energético das baterias dos satélites em área de eclipse.

Palavras-Chave—Roteamento, Consumo Energético, Eclipse, Capacidade, Redes de Satélites LEO.

Abstract—This paper presents a routing metric for Low Earth Orbit (LEO) satellites, in order to increase the delivered traffic demand, observing the energy consumption of satellites in eclipse. Our approach takes advantage of the movement of satellites in their orbits to favor data traffic between satellites that are exposed to sunlight, as opposed to satellites in the eclipse area, in order to reduce the battery discharge depth. In addition, the capacities of the links between adjacent satellites are also to avoid congestions in the satellite network.

Simulation results show that it is possible to increase the total demand of about 14.10 %, in the situation where there are 100 sources with a rate of 1.5Mbps, when compared to the metric LASER introduced in [1] without increasing the energy consumption of the batteries of the satellites in the eclipse area.

Keywords—Routing, Energy Consumption, Eclipse, Capacity, LEO Satellite Networks.

I. INTRODUÇÃO

Com a globalização, o acesso à Internet tem se tornado indispensável. Neste contexto, os satélites artificiais constituem uma infraestrutura fundamental de telecomunicações, principalmente nas regiões que demandam alto custo para a implantação de sistemas de comunicação que permitam a interconexão com redes externas, como a Internet.

Francisco Enedelson Passos da Maceno e Celso Barbosa Carvalho, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Amazonas, Manaus - AM, E-mails: enedelson@gmail.com, ccarvalho_@ufam.edu.br. Edjair de Sousa Mota, Icomp, Universidade Federal do Amazonas, Manaus - AM, E-mail: edjair@icomp.ufam.edu.br.

Conforme pode-se verificar em [2], um único satélite não consegue proporcionar uma cobertura global. Para que isto seja possível, utiliza-se uma constelação de satélites composta por N_p órbitas ou planos orbitais e M_s satélites uniformemente distribuídos em cada plano. A Figura 1 ilustra um exemplo de uma constelação LEO.

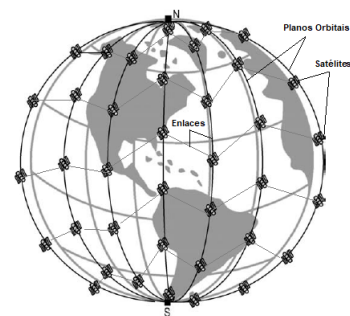


Fig. 1: Exemplo de uma constelação de satélites LEO.

Os satélites de uma constelação LEO comunicam-se uns com os outros utilizando enlaces de rádio, formando uma topologia de rede variável no tempo. Durante o movimento em suas órbitas, os satélites podem entrar em áreas sem incidência da luz solar, denominadas de áreas de eclipse. Segundo [1], os satélites de uma constelação LEO (ex: constelação Iridium), levam cerca de 100 minutos para dar uma volta completa no planeta e podem ficar até 36 minutos nas áreas de eclipse.

Quando expostos à luz do sol, os painéis solares fornecem energia necessária para o funcionamento dos satélites e a energia residual captada é utilizada para carregar suas baterias. Por outro lado, quando os satélites estão nas áreas de eclipse, as baterias são suas únicas fontes de energia e, conseqüentemente, são descarregadas ao fornecerem energia para o envio/recebimento de dados, bem como para o consumo energético de operação nominal do satélite.

Segundo [4], a profundidade de descarga constitui um fator importante que define a vida útil das baterias. Caso a profundidade de descarga aumente em 15%, o tempo de vida útil da bateria pode reduzir pela metade. Uma vez que é impraticável substituir equipamentos nos satélites em órbita, a profundidade de descarga das baterias é fator importante no tempo de vida dos satélites.

Em razão disso, desenvolve-se neste artigo, uma métrica de roteamento que considera a capacidade dos enlaces da rede de satélites e o consumo energético das baterias dos satélites em áreas de eclipse, a fim de evitar o congestionamento da rede, sem prejuízo ao consumo energético das baterias. Para tanto, desenvolvemos, em

software MATLAB, um modelo computacional que nos permite simular o tráfego de dados em uma constelação de satélites LEO, utilizando-se de métricas de roteamento aplicadas ao algoritmo de menor caminho de Dijkstra [5].

As simulações realizadas apresentaram melhoria de até 14,10% nas demandas de tráfego atendidas, mantendo-se valores similares do consumo energético, quando comparado à métrica introduzida em [1].

As próximas seções deste artigo estão organizadas como a seguir: A Seção II apresenta os trabalhos relacionados; Na Seção III é apresentado o modelo computacional utilizado para simular redes de satélites LEO; Na Seção IV é apresentada a métrica proposta; Na Seção V é apresentada a avaliação de desempenho; Na Seção VI expomos as conclusões e trabalhos futuros.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Em [1] foi apresentada a métrica de roteamento em redes de satélites LEO, *Loction and loAd Sensitive Routing* (LASER), aplicada ao algoritmo de *Dijkstra* [5] para determinar o melhor caminho, favorecendo o tráfego entre os satélites que não estejam na área de eclipse. As simulações apresentadas mostraram que LASER diminuiu a profundidade de descarrega das baterias em torno de 11%, quando comparada com a métrica de tempo de propagação de um pacote em um enlace. Entretanto, LASER não considera a capacidade dos enlaces [6], podendo ocorrer congestionamentos na rede de satélites.

Em [7] propõe-se método de roteamento em redes de satélites LEO, onde cada satélite escolhe o próximo salto com atraso mínimo de propagação de acordo com sua localização geográfica, sem necessidade de armazenar uma tabela de roteamento. Os resultados das simulações mostraram que a proposta possui melhor desempenho, em termos de taxa de transferência de dados e taxa de perda de pacotes, quando comparada a outros algoritmos que utilizam tabelas de roteamento. No entanto, os autores não levaram em consideração o consumo de energia dos satélites.

Os autores de [8] propuseram algoritmos de roteamento de múltiplos caminhos que visam maximizar o tempo de vida da rede, reduzindo congestionamento, considerando o consumo energético e a demanda de tráfego em intervalos de tempo definidos. Os resultados mostraram que as estratégias de roteamento aumentaram o tempo de vida útil nas redes de satélites LEO, com restrições de energia. No entanto, a proposta está fundamentada na criação de algoritmos de roteamento e não na proposta de métricas a serem utilizadas pelos algoritmos de roteamento existentes. Além disso, a proposta não considera o tempo de exposição dos satélites nas áreas de eclipse, tal como em nossa proposta.

Em [10] foi proposto método que determina a conectividade de uma rede de satélites LEO baseado na teoria espectral dos grafos, visando quantificar a importância dos enlaces entre satélites que estejam em áreas de eclipse e que possam ser desativados. As simulações apresentadas mostram que o desligamento de um número significativo

de enlaces entre satélites que estão na área de eclipse, contribuindo para uma melhoria do consumo energético dos satélites. No entanto, a proposta não considera a capacidade dos enlaces, podendo ocorrer congestionamento na rede.

Por fim, o trabalho desenvolvido por [11] se firma na determinação dinâmica dos custos dos enlaces em uma rede de satélites LEO. Segundo os autores, o algoritmo proposto *Link Congestion Oriented Routing Information Protocol* (LCO-RIP) pode efetivamente reduzir a taxa de perda de pacotes da rede com pequeno incremento no atraso da entrega dos pacotes. No entanto, o trabalho se limita à melhoria do congestionamento da rede, sem observar o consumo energético dos satélites.

III. MODELAGEM COMPUTACIONAL

O escopo deste artigo é limitado à constelação de satélites Iridium, composta por $N_p = 6$ planos orbitais com $M_s = 11$ satélites uniformemente distribuídos.

A. Localização geográfica dos satélites e ocorrência de eclipses

Utilizamos o método introduzido em [12] para determinar a propagação dos satélites e a ocorrência de eclipse.

A Figura 2 ilustra o resultado da simulação da ocorrência de eclipses. Na Figura, as barras representam a quantidade de vezes que um dos satélites entra em área de eclipse. No eixo x estão representados os horários de entrada e saída do satélite na área de eclipse. Observa-se que em 24h, o satélite entra 14 vezes em eclipse por cerca de 36min.

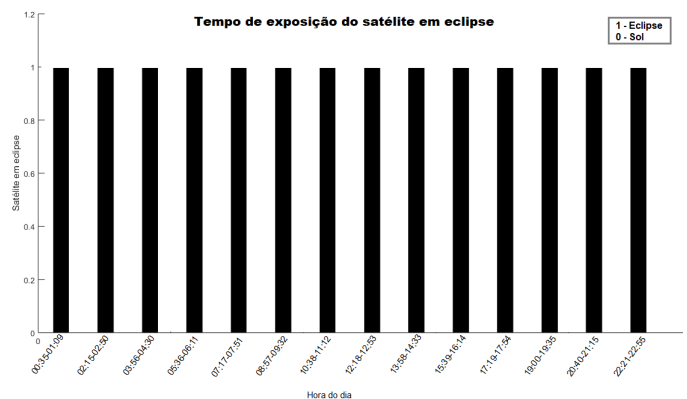


Fig. 2: Tempo de exposição do satélite em eclipse.

B. Topologia da rede de satélites

Conforme [1], cada satélite possui 04 enlaces com os satélites adjacentes, sendo 02 entre satélites adjacentes do mesmo plano e 02 entre satélites de planos adjacentes, exceto na região polar, compreendida entre as latitudes de 75° e 90° nos hemisférios norte e sul, e na região de contrarotação que é o encontro entre o primeiro e o último plano, onde os satélites se movem em sentido oposto.

De acordo com [1], a distância L_a que separa os satélites do mesmo plano é constante e pode ser calculada, em *km*,

pela Equação 1.

$$L_a = \sqrt{2}R\sqrt{1 - \cos(360^\circ \frac{1}{M_s})} \quad (1)$$

em que R é o raio orbital. Já a distância L_e , entre os satélites dos planos adjacentes, aumenta ou diminui à medida que os satélites se aproximam ou se afastam da linha do equador, respectivamente. Sua determinação depende da latitude $\Phi_k(t)$ do satélite que detém o enlace e é dada, em km , pela Equação 2.

$$L_e = \sqrt{2}R\sqrt{1 - \cos(360^\circ \frac{1}{2N_s})} \cos\Phi_k(t) \quad (2)$$

Uma rota origem/destino pode conter diversos saltos. Deste modo, o cálculo do tempo de propagação dos sinais em múltiplos saltos de uma rota é dado pela Equação 3.

$$T_p = \frac{\sum_{j=1}^{h_p} L(S_{<n_1, m_1>}, S_{<n_{q+1}, m_{q+1}>})}{C_l} \quad (3)$$

em que h_p é o número de saltos da rota e C_l a velocidade da luz. $L(S_{<n_1, m_1>}, S_{<n_{q+1}, m_{q+1}>})$ representa a distância entre os satélites da rota.

Neste artigo, a modelagem da rede consiste em um grafo direcionado $G(V(t), E(t))$ em que o vértice $V(t)$ representa cada satélite da rede e as arestas $E(t)$ os enlaces ativos entre os satélites adjacentes. Em nossa simulação não consideramos a ocorrência de erros de transmissão/recepção.

C. Consumo energético dos satélites

O consumo energético de um satélite se dá pela energia gasta em sua operação nominal e o envio e recebimento de dados. Segundo [8], a captação energética de um satélite $EC_k(t)$, em um dado intervalo de tempo Δ_t , é dada pela Equação 4.

$$EC_k(t) = P_c * \max\{0, \Delta_t - ST_k(t)\} \quad (4)$$

em que $ST_k(t)$ é a fração de tempo que o satélite k permaneceu na área de eclipse durante Δ_t , e quando o satélite é exposto ao sol, $ST_k(t) = 0$. P_c é a potência de carga, que por simplicidade, foi considerada como uma constante. Já o consumo energético $ED_k(t)$ de um satélite k , é dado pela Equação 5.

$$ED_k(t) = \left(\sum_{k \neq l} \frac{X_{kl}(t)}{C_{kl}(t)} P_s + \sum_{k \neq l} \frac{X_{kl}(t)}{C_{kl}(t)} P_r + P_o \right) \Delta_t \quad (5)$$

em que $X_{kl}(t)$ é o somatório de todas as demandas de tráfego no enlace entre os satélites k e l . $C_{kl}(t)$ é a capacidade do enlace $k - l$, P_s , P_r e P_o representam as constantes de demanda de potência de transmissão, recepção e operação nominal do satélite, respectivamente.

As Equações 4 e 5 nos permitem calcular a energia residual de um satélite $B_k(t)$, conforme Equação 6.

$$B_k(t) = \min\{B_{max}, B_k(t-1) - ED_k(t) + EC_k(t)\} \quad (6)$$

em que B_{max} é a capacidade máxima da bateria, $B_k(t-1)$ a energia residual do satélite k no início do intervalo de

tempo Δ_t . Em nosso simulador, a capacidade energética das baterias EB_k foi modelada por uma tripla, conforme Equação 7.

$$EB_k = \{k, C_i, C_f\} \quad (7)$$

em que k representa o k –ésimo satélite da constelação C , com $k \in \{1, \dots, T_s\}$, T_s é o número total de satélites da constelação, C_i e C_f as capacidades energéticas das baterias no início e no final de um *snapshot* definido como um intervalo de tempo de simulação.

D. Demanda de tráfego

Para determinação da demanda de tráfego, adotamos o método utilizado em [4], [13] e [14] que fornece a expectativa do tráfego de voz em uma rede de satélites LEO.

A Tabela I apresenta a porcentagem de tráfego entre os continentes em uma dada hora do dia, considerando as estatísticas de uso da Internet no ano de 2017, disponibilizadas em [15].

TABELA I: Tráfego Entre Continentes - 2017 (%).

| Origem | Destino | | | | | |
|--------------|--------------|--------|-------|---------|------------|--------|
| | Am. do Norte | Europa | Ásia | Oceania | Am. do Sul | África |
| Am. do Norte | 49,13 | 14,61 | 21,94 | 0,64 | 8,49 | 5,20 |
| Europa | 11,24 | 47,36 | 24,96 | 0,46 | 3,94 | 12,04 |
| Ásia | 5,82 | 14,10 | 70,49 | 1,27 | 1,79 | 6,54 |
| Oceania | 7,40 | 8,44 | 56,23 | 14,88 | 4,58 | 8,47 |
| Am. do Sul | 15,94 | 10,37 | 13,20 | 0,82 | 49,42 | 10,24 |
| África | 7,05 | 24,72 | 23,48 | 0,84 | 7,50 | 36,40 |

A representação das demandas em nosso simulador foi modelada por uma tripla, conforme Equação 8.

$$D_s(t) = \{i, j, x\} \quad (8)$$

em que s representa a s –ésima fonte de dados com $s \in \{1, \dots, F\}$, F é o número total de fontes, x a taxa de dados constante (*Constant bit rate - CBR*), em Mbps, i e j as zonas de origem e destino, respectivamente.

IV. PROPOSTA DE MÉTRICA DE ROTEAMENTO

A métrica de roteamento LASER, proposta por [1], combina o tempo de propagação com o nível remanescente das baterias dos satélites nas áreas de eclipse. Com base nestes dois parâmetros, cada satélite LEO pode calcular o valor de LASER para cada enlace, normalizados pelo método de mínimos e máximos de acordo com [16], consoante Equação 9.

$$laser_{k,l}(t) = w_1 \frac{T_{k,l}(t) - T^{min}}{T^{max} - T^{min}} + w_2 \frac{D_{k,l}(t) - D^{min}}{D^{max} - D^{min}} \quad (9)$$

em que $T_{k,l}(t)$ é o tempo de propagação no enlace entre os satélites k e l , w_1 e w_2 representam os pesos que podem ser ajustados de acordo com a aplicação. $D_{k,l}(t)$ é a quantidade que depende do nível das baterias dos satélites k e l em um determinado instante de tempo t , calculado conforme Equação 10.

$$D_{k,l}(t) = \frac{e_k}{B_k(t)} + \frac{e_l}{B_l(t)} \quad (10)$$

$$e = \begin{cases} 1, & \text{Se o satélite está em eclipse.} \\ 0 & \text{Se o satélite está exposto ao sol.} \end{cases}$$

B é a energia residual do satélite.

Uma vez que a métrica LASER não observa a capacidade dos enlaces da rede, apresentamos a métrica Energy and Capacity Aware Routing metric in LEO Satellite networks (ECARS), que foi obtida pela extensão da métrica LASER, considerando a capacidade dos enlaces ativos e a energia residual dos satélites em eclipse, conforme Equação 11.

$$ECARS_{k,l}(t) = w_1 \frac{T_{k,l}(t) - T^{min}}{T^{max} - T^{min}} + w_2 \frac{D_{k,l}(t) - D^{min}}{D^{max} - D^{min}} + w_3 \frac{P_{k,l}(t) - P^{min}}{P^{max} - P^{min}} \quad (11)$$

em que $P_{k,l}(t)$ é a quantidade que depende da capacidade do enlace $C_{k,l}(t)$ entre os satélites k e l em um determinado instante de tempo t , calculado de acordo com a Equação 12.

$$P_{k,l}(t) = 1 - C_{k,l}(t)/C_{isl} \quad (12)$$

C_{isl} é a capacidade do total do enlace entre os satélites k e l . Os pesos w_1 , w_2 e w_3 podem ser ajustados de acordo com a aplicação.

V. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Nesta seção, apresentamos os resultados da avaliação de desempenho, obtidos a partir das simulações realizadas.

A. Parâmetros da simulação

Foram realizadas 30 simulações de 12.200 segundos, o que equivalem a 02 (duas) revoluções dos satélites ao redor da Terra, iniciando no dia 01 de junho de 2018 às 12h30min00s. Utilizamos o algoritmo de Dijkstra [5] no qual aplicaram-se as métricas ECARS, LASER [1] e TP para determinar o caminho entre as demandas de tráfego com seus respectivos satélites de origem e destino.

Adotamos um *snapshot*, que representa uma foto da rede em um dado instante, com intervalo de duração de $\Delta_t = 100s$, dado por [9], totalizando 122 amostras por simulação das quais foram determinadas a média com intervalo de confiança 95%.

No início de cada *snapshot*, as demandas são restabelecidas e ao final de cada *snapshot*, determinam-se novas rotas para as métricas avaliadas, de acordo com as variáveis demanda de tráfego, topologia da rede, energia residual dos satélites e capacidade remanescente dos enlaces.

Para demanda de tráfego, foram utilizadas 100 fontes com taxa CBR que varia de 0,5Mbps a 1,5Mbps. Já a capacidade total de cada enlace é de 10Mbps e a capacidade de carga da bateria é de 117KJ [1]. As constantes de transmissão, recepção, operação nominal e captação energética são 7W, 3W, 4W e 20W [8]. Para os pesos da Equação 9 que define a métrica LASER, utilizamos os valores dados pelos autores, quais sejam, $w_1 = 0,5$ e $w_2 = 0,5$. Já para a Equação 11 que define a métrica ECARS, utilizamos os pesos $w_1 = 0,35$, $w_2 = 0,35$ e $w_3 = 0,3$. Estes pesos foram escolhidos uma vez que através de simulações apresentaram melhor desempenho, relacionado ao tráfego de dados e ao consumo energético dos satélites nas áreas de eclipse.

B. Demanda total atendida

A demanda total atendida representa a porcentagem do total de demandas que efetivamente foram entregues do satélite de origem ao satélite de destino de uma rota fim-a-fim.

A Figura 3 ilustra os resultados obtidos da média da demanda total atendida. No gráfico da Figura 3, também visualiza-se a métrica TP, que representa o tempo de propagação dos sinais em um enlace, obtida atribuindo os pesos $w_1 = 1$ e $w_2 = 0$ à equação 9 [1].

Os resultados obtidos demonstram que à medida que se aumenta a taxa de dados, a demanda total atendida diminui, em razão do congestionamento dos enlaces que compõem as rotas. No entanto, observa-se um melhor desempenho da demanda total atendida para a métrica ECARS em relação à métrica LASER. Para a taxa máxima de 1,5Mbps, o percentual de melhoria observado para a métrica ECARS em relação à métrica LASER foi de cerca de 14,10% para 100 fontes.

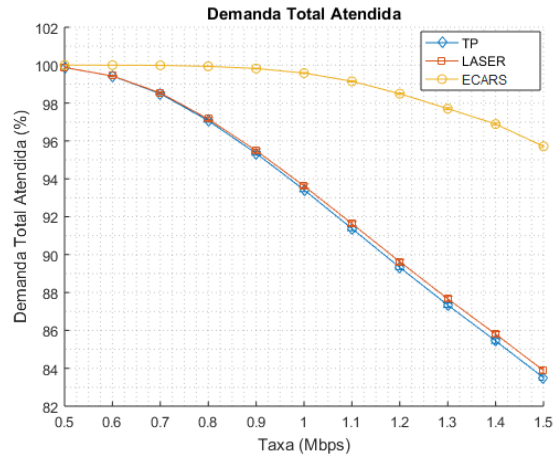


Fig. 3: Demanda Total Atendida (100 fontes).

C. Fontes Bloqueadas

Para se enviar pacotes de uma origem a um determinado destino, vários satélites podem ser utilizados para compor a melhor rota para entrega desses pacotes. Em determinados casos, não é possível a entrega final destes pacotes em consequência do congestionamento de um ou mais enlaces de uma rota origem/destino estabelecida, caso em que a respectiva fonte é bloqueada.

A Figura 4 ilustra a média de fontes bloqueadas. Como esperado para a métrica ECARS, o número de fontes bloqueadas é menor em relação às demais métricas, uma vez que nela é considerada a capacidade dos enlaces quando do estabelecimento das rotas origem/destino.

D. Energia residual da bateria durante eclipses

A Figura 5 ilustra a média de energia remanescente de um determinado satélite em eclipse, em uma determinada rodada de simulação. Nesta simulação em específico, utilizaram-se 100 fontes com taxa de 1,5Mbps.

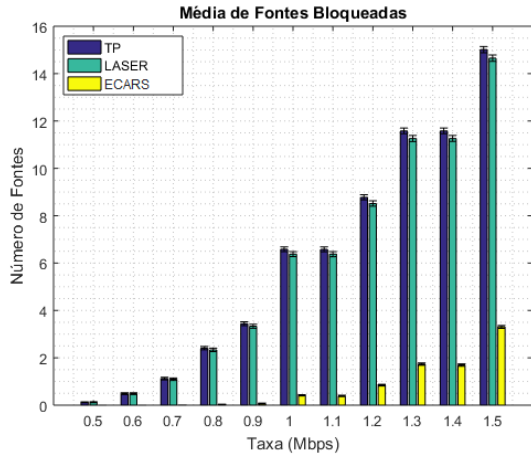


Fig. 4: Média de fontes bloqueadas (100 fontes).

Os resultados demonstram que para a métrica ECARS, quando o tempo de exposição em eclipse é superior a 20min, a energia residual da bateria tende a diminuir para um valor inferior a 90% da capacidade total da bateria. No entanto, a energia residual ainda é maior quando comparado a métrica TP, mantendo, dentro do intervalo de confiança, o mesmo consumo energético da métrica LASER. Com isto, percebe-se que quando comparada com a métrica LASER, nossa proposta apresenta consumo de energia similar, porém com maior porcentagem de demandas atendidas, conforme ilustrado na Figura 3.

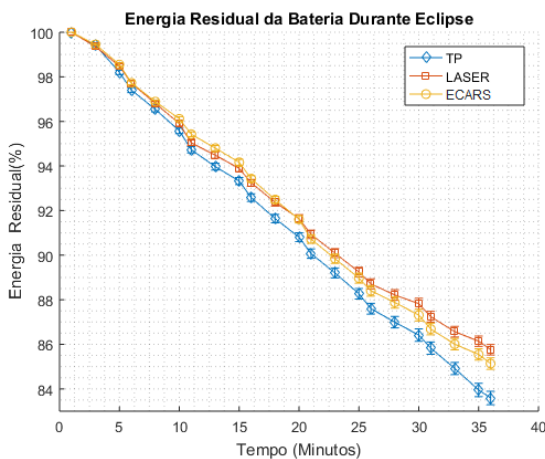


Fig. 5: Energia residual da bateria durante eclipse 100 fontes (Taxa de 1,5 Mbps).

VI. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados demonstraram que é possível aumentar a demanda total atendida observando o consumo de energia das baterias dos satélites em eclipse. Para 100 fontes e taxa de dados de 1,5 Mbps, a métrica ECARS proposta apresentou um aumento na porcentagem de demandas atendidas em cerca de 14,10% quando comparado com a métrica LASER, mantendo dentro do intervalo de confiança, consumo de energia similar para ambas as métricas.

Em trabalhos futuros, propõe-se conceber e implementar uma solução distribuída em simuladores de eventos discretos, aplicando a métrica ECARS em uma rede de satélites híbrida composta por constelações de satélites de órbitas baixa e média. O objetivo principal será investigar se é possível melhorar o consumo energético dos satélites em eclipse, tornando menos atrativos os enlaces entre os satélites da baixa órbita que estejam em áreas de eclipses, desviando o tráfego para os satélites da órbita média.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa, conforme previsto no Art. 48 do decreto nº 6.008/2006, foi financiada pela Samsung Eletrônica da Amazônia Ltda, nos termos da Lei Federal nº 8.387/1991, através de convênio nº 004, firmado com o CETELI/UFAM; pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES); pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM/Programa PPP).

REFERÊNCIAS

- [1] HUSSEIN, M.; JAKLLARI, G.; PAILLASSA, B. *On routing for extending satellite service life in LEO satellite networks*. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2014.
- [2] Nguyen, Hoang Nam. *Routing and Quality-of-Service in Broadband Leo Satellite Networks*. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [3] Maini, Anil K and Agrawal, Varsha. *Satellite technology: principles and applications*. John Wiley & Sons, 2011.
- [4] HUSSEIN, M.; JAKLLARI, G.; PAILLASSA, B. *Network pruning for extending satellite service life in LEO satellite constellations*. Wireless Networks. Springer, 2017.
- [5] Dijkstra, Edsger W. *A note on two problems in connexion with graphs*. Numerische mathematik. Springer 1959.
- [6] Carvalho, Celso Barbosa, and José Ferreira De Rezende. *Routing in IEEE 802.11 wireless mesh networks with channel width adaptation*. 2010 The 9th IFIP Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net). IEEE, 2010.
- [7] Liu, Ximmeng et al. *A low-complexity probabilistic routing algorithm for polar orbits satellite constellation networks*. Communications in China (ICCC). IEEE, 2015.
- [8] Zhou, Di et al. *Lifetime maximization routing with guaranteed congestion level for energy-constrained LEO satellite networks*. Vehicular Technology Conference. IEEE, 2016.
- [9] Tang, Zhu et al. *Improving the snapshot routing performance through reassigning the inter-satellite links*. Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2015 IEEE Conference on.
- [10] Hussein, Mohammed and Elayyan, Israa and Ghanem, Wasel. *Topology-aware approach for reducing power consumption in LEO satellite constellations*. International Conference on. IEEE, 2016.
- [11] Fan, Wei-Qiang and Zhang, Tao. *A Link Congestion Oriented LEO Network Routing Protocol*. IEEE 18th International Conference on Communication Technology (ICCT). IEEE, 2018.
- [12] Ortizlongo, C.R. *Method for the calculation of spacecraft umbra and penumbra shadow terminator points*. NASA, 1995.
- [13] Chen, Chao and Ekici, Eylem. *A Routing Protocol for Hierarchical LEO/MEO Satellite IP Networks*. Springer-Verlag New York, Inc., 2005.
- [14] Long, Fei. *Satellite network robust QoS-aware routing*. Springer, 2014.
- [15] Miniwatts, Marketing G.. *Normalization and other topics in multi-objective optimization*, 2006. Disponível em <<https://www.internetworldstats.com/stats.htm>>, Acesso em 16 abr. 2018.
- [16] Grodzevich, Oleg and Romanko, Oleksandr. *Internet Usage Statistics*, 2018.