

Uma Métrica de Roteamento com Eficiência Energética para o RPL da Internet das Coisas

Hermano Pereira, Guilherme Luiz Moritz, Mauro Fonseca

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR
80230-901 - Curitiba, PR - Brazil

{hermanopereira,moritz,maurofonseca}@utfpr.edu.br

Abstract. *The Internet of Things is gaining the attention of the market, industry, and the scientific community. The integration of WSNs and the Internet led the IETF to define new protocols. The RPL is one of the most important systems, a routing protocol for low-power and lossy networks. Among the routing metrics, which selects reliable paths, ETX stands out. However, the rapid exhaustion of battery-powered bottleneck nodes is still a problem. In this work, we present a new metric, based on the estimated energy consumption of the network interface, which collaborates with reliability and load balancing and increases the network's lifetime.*

Resumo. *A Internet das Coisas está ganhando a atenção do mercado, da indústria e da comunidade científica. A integração das WSNs com a Internet levou a IETF a especificar novos protocolos. Um dos principais é o RPL, um protocolo de roteamento para redes que possuem perdas de pacotes consideráveis. Dentre as métricas de roteamento, destaca-se a ETX, que contribui na escolha de caminhos confiáveis. No entanto, a rápida exaustão de energia da bateria dos nós de gargalo ainda é um problema. Nesse contexto, apresenta-se aqui uma nova métrica baseada no consumo energético estimado da interface de rede, a qual colabora não apenas na confiabilidade, mas também no balanceamento de carga e no prolongamento do tempo de vida da rede.*

1. Introdução

Com o advento da *Internet das Coisas* (IoT — *Internet of Things*) as redes pessoais sem fio (WPANs — *Wireless Personal Area Networks*) e as redes de sensores sem fio (WSNs — *Wireless Sensors Networks*) estão recebendo uma atenção especial dos pesquisadores, pois questões como segurança, confiabilidade e eficiência energética estão oferecendo novos desafios. A IETF (*Internet Engineering Task Force*) se refere à essas redes com a sigla LLNs (*Low-power and Lossy Networks*), ou seja, redes com perdas e de baixa potência. Em geral essas redes são compostas por dispositivos computacionalmente limitados e alimentados por bateria. Sendo assim, a IoT demandou por novos padrões e novos protocolos da IETF, o que resultou na adaptação do IP (*Internet Protocol*): o 6LoWPAN (IPv6 over Low-power WPAN), descrito no documento RFC (*Request for Comments*) 4919 [Kushalnagar et al. 2007]. Além disso, a necessidade de um protocolo de roteamento particular para LLNs resultou no RPL (*Routing Protocol for LLNs*) — RFC 6550 [Winter et al. 2012]. O RPL permite configurar diferentes métricas de roteamento para

diferentes aplicações, conforme descreve o documento RFC 6551 [Vasseur et al. 2012]. Porém, para qualquer métrica a ser adotada, é necessário configurar uma função objetiva (OF — *Objective Function*). Até o momento desta pesquisa apenas duas OFs foram definidas pela IETF: a Função Objetiva Zero (OF0 — *Objective Function Zero*) e a Função Objetiva de Posicionamento Mínimo com Histerese (MRHOF — *Minimum Rank with Hysteresis Objective Function*). A OF0 não faz o uso de métricas, porém faz a seleção de melhor caminho de maneira similar à métrica de contagem de saltos — RFC 6552 [Thubert 2012]. Já a MRHOF permite o uso de uma das três métricas: a contagem de saltos, a latência e a transmissão esperada (ETX — *Expected Transmission Count*), conforme RFC 6719 [Gnawali and Levis 2012]. Nota-se, no entanto, que a IETF não especificou OFs para balanceamento de carga e eficiência energética, e nem mesmo para aplicar as demais métricas descritas no documento RFC 6551. Sendo assim, novas métricas e novas OFs são assuntos em aberto para serem explorados pela comunidade científica.

Em geral, no roteamento em LLNs, há uma preferência pela métrica ETX, pois esta colabora com a confiabilidade na entrega de pacotes. No entanto, a seleção de caminhos confiáveis não contribui para o balanceamento de carga, o que acaba resultando na rápida exaustão de energia da bateria dos nós de gargalo. Nesse contexto este artigo apresenta a EEM (*Energy Estimation Metric*), uma nova métrica de roteamento baseada no consumo estimado de energia da interface de rede. Uma vez que um dispositivo de LLN pode calcular a sua EEM, esse consumo estimado passa a ser divulgado para os dispositivos vizinhos, contribuindo assim na seleção balanceada de caminhos e consequente redução do consumo energético. Para avaliar esta solução, a EEM foi implementada em um ambiente simulado, e os resultados dos experimentos mostraram que esta métrica superou a métrica ETX em tempo de vida da rede, na taxa de entrega de pacotes e obteve um menor atraso médio fim-a-fim. Portanto, pode-se dizer que a EEM é uma alternativa promissora à métrica ETX para o roteamento em LLNs, ou seja, para o RPL da *Internet das Coisas*.

Uma revisão do RPL é apresentada na Seção 2 e os trabalhos relacionados são elencados na Seção 3. A Seção 4 apresenta a proposta da nova métrica de roteamento e a Seção 5 detalha os materiais e métodos utilizados para realizar os experimentos. A Seção 6 apresenta as discussões sobre os resultados obtidos e, por fim, a Seção 7 apresenta a conclusão e os direcionamentos para os trabalhos futuros.

2. Revisão do RPL

O RPL foi projetado para atender ao roteamento nas seguintes LLNs: as redes de sensores sem fio em cenário urbano (*Urban-LLNs*), em ambientes industriais (*Industrial LLNs*), em automações residenciais (*Home Automation*) e prediais (*Building Automation*). Para tanto, o ROLL-WG (*Routing Over Low-power and Lossy networks Working Group*) empregou esforço na confecção do documento RFC 6550, o qual propõe o RPL como o padrão da *Internet* para o roteamento em LLNs.

O objetivo do RPL é formar um Grafo Acíclico Direcionado (DAG — *Directed Acyclic Graph*) e estabelecer o melhor caminho entre os nós com um ou mais nós raiz (*root*). Quando um grafo de uma topologia possui apenas um nó raiz, este é chamado de DAG Orientado ao Destino ou simplesmente de DODAG (*Destination Oriented DAG*). Para construir e manter um DODAG, o RPL conta com três tipos de mensagens: 1) a

mensagem DIS (*DODAG Information Solicitation*) que é a primeira mensagem a ser enviada aos nós vizinhos quando um nó deseja ingressar em um DODAG; 2) a mensagem DIO (*DODAG Information Object*) que é a que carrega as informações suficientes para que o nó vizinho possa tomar decisões de roteamento; e 3) a mensagem DAO (*Destination Advertisement Object*) que é o objeto de anúncio em sentido *upward* — do nó ingressante para o nó raiz — para informar que selecionou o nó pai. Também há a mensagem DAO-Ack (*DAO Acknowledgement*) que opcionalmente pode ser utilizada como mensagem de confirmação no sentido *downward* — do nó raiz para o nó ingressante.

Para construir um grafo DODAG, o nó raiz é o primeiro a enviar mensagens DIO em respostas às mensagens DIS. Uma vez que os nós vizinhos decidem qual será o nó pai, através de mensagens DAO, esses também poderão enviar mensagens DIO para os seus nós vizinhos, estendendo assim o grafo DODAG. Assim, cada nó que precisa ingressar na topologia deverá enviar mensagens DIS conforme ilustra o nó 6 na Figura 1a. Na sequência, o nó ingressante recebe mensagens DIO dos seus nós vizinhos que são candidatos a nó pai, assim ilustra a Figura 1b. Uma vez que o nó ingressante possui informações suficientes sobre os caminhos de roteamento, o mesmo confirmará a sua escolha de nó pai enviando uma mensagem DAO para o nó raiz — ou apenas para o nó pai dependendo do modo de operação — conforme ilustra a Figura 1c. Por fim, o novo nó passa a integrar o DODAG após calcular o seu próprio valor de *rank* junto ao valor de *rank* do nó pai preferido (*preferred parent*). A Figura 1d mostra o nó raiz com o menor valor de *rank* da topologia, valor o qual é monotonicamente crescente, de 128 em 128, até os nós das extremidades — um procedimento necessário para evitar laços de roteamento. Além disso o valor 128 é apenas um exemplo ilustrativo, pois o valor de *rank* depende da OF que está sendo utilizada.

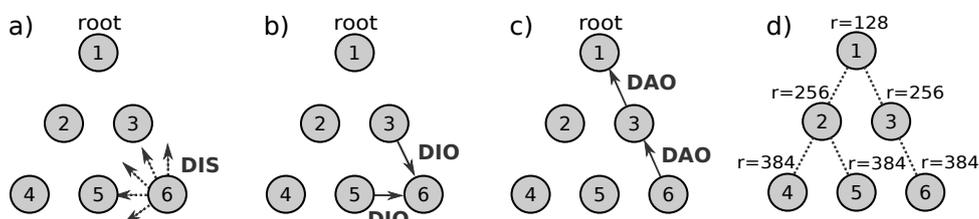


Figura 1. Ilustração de um nó ingressando em uma topologia RPL: a) mensagens DIS para ingressar em um DODAG; b) mensagens DIO com informações de roteamento; c) mensagens DAO para confirmar o nó pai escolhido; e d) os valores de *rank* incrementados de 128 em 128 após a convergência RPL.

No documento RFC 6551 estão descritas as métricas de roteamento para o RPL. As informações de métricas são divulgadas para os nós vizinhos através de um recipiente de métrica DAG (*DAG Metric Container*), recipiente este que é incluído em mensagens DIO ou em mensagens DAO. São oito as métricas especificadas em RFC: 1) objeto de estado ou atributo do nó; 2) objeto de energia do nó, que no caso de energia coletada ou energia de bateria, a mesma pode ser mensurada como energia remanescente; 3) objeto para contagem de saltos; 4) taxa de transferência em *bytes* por segundo; 5) latência do enlace medida em microssegundos; 6) níveis de qualidade do enlace; 7) enlaces coloridos para customização; e 8) ETX, para a probabilidade de transmissão com sucesso pelo enlace.

Dentre as métricas de roteamento, a ETX merece destaque por ser a mais comum

em LLNs (conforme RFC 6550). Do artigo original [De Couto et al. 2003], calcula-se a métrica ETX conforme a equação 1, onde df (*delivery — forwarded*) é a medida de probabilidade em que um pacote pode ser recebido com sucesso pelo seu nó vizinho, e dr (*delivery — received*) é a probabilidade em que um pacote de confirmação pode ser recebido com sucesso.

$$ETX = \frac{1}{df \times dr} \quad (1)$$

A integração do RPL com as métricas de roteamento depende das funções objetivas (OFs). Uma OF define como as métricas serão utilizadas para a escolha do melhor caminho até o nó raiz. A OF também define como será a seleção do nó pai preferido e o cálculo do valor de *rank*. Sendo assim, uma OF abstrai as informações de roteamento sem a necessidade de tratar dos detalhes de comunicação e da manutenção do RPL. A OF0 — RFC 6552 — é a OF básica da IETF por não possuir métricas, mas utiliza os valores de *rank* de maneira similar à métrica de contagem de saltos. Já a MRHOF — RFC 6719 — apresenta dois mecanismos: 1) seleção do nó pai com o menor caminho até o nó raiz, ou seja, o caminho com um *rank* mínimo; e 2) a troca de nó pai somente quando a diferença entre os caminhos for menor que um limiar (*threshold*), esse mecanismo é chamado de histerese. A MRHOF pode fazer o uso de uma das três métricas: contagem de saltos, latência ou ETX. Além disso, é permitida a configuração da métrica ETX junto ao valor de *rank*, o que dispensa o uso de DAGMC e reduz o tamanho das mensagens DIO. A MRHOF faz a seleção do novo nó pai preferido (pp_{new} — *new preferred parent*) conforme ilustra a equação 2, onde o custo da métrica de cada nó vizinho candidato a nó pai (cn — *candidate neighbor*) é comparado ao custo da métrica com o nó pai preferido atual (pp — *preferred parent*) e calculado com a diferença de um dado limiar (pst — *parent switch threshold*). Assim, a histerese faz com que a troca de nó pai seja evitada quando o custo para um novo caminho é pouco significativa, o que resulta em estabilidade na topologia de roteamento.

$$pp_{new} = \begin{cases} cn, & \text{if } (cn < pp - pst). \\ pp, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

3. Trabalhos Relacionados

Na literatura é possível encontrar diversos trabalhos que propõem melhorias ao RPL, seja em parâmetros, métricas, combinação de métricas, algoritmos, modificações e até mesmo soluções alternativas. Nesta Seção é apresentado um levantamento apenas de trabalhos que propuseram novas métricas e que superaram a métrica ETX em uma ou mais medidas de desempenho. Para um levantamento mais amplo sobre o RPL recomenda-se consultar o trabalho de [Kim et al. 2017].

O trabalho de [Kamgueu et al. 2013] foi um dos pioneiros em propor uma métrica para obter eficiência energética junto ao RPL, de acordo com os seus experimentos a métrica *energy* superou a métrica ETX no tempo de vida da rede. [Gonizzi et al. 2013] apresentaram uma métrica baseada no cálculo do atraso do caminho de roteamento, a qual superou a métrica ETX no baixo atraso médio na entrega de pacotes. [Yang et al. 2014]

apresentaram a métrica de índice de estabilidade, baseada nas mensagens de controle do RPL, a solução superou a métrica ETX na taxa de entrega de pacotes. [Xiao et al. 2014] apresentaram a métrica *Per-Hop* ETX, baseada no cálculo da média aritmética da métrica ETX ao longo do caminho de roteamento, a qual superou a métrica ETX em baixa latência, taxa de entrega de pacotes e consumo reduzido de energia da rede. [Todolí-Ferrandis et al. 2015] utilizaram um cenário real para implementar a sua métrica de energia, a qual superou a métrica ETX em tempo de vida dos nós. Um trabalho de destaque na comunidade é o de [Iova et al. 2015], o qual apresentou a métrica ELT (*Expected Lifetime*) que combinada ao mecanismo de roteamento por múltiplos caminhos obteve resultados significativos em eficiência energética, porém com taxas de entrega de pacotes aproximadas às taxas obtidas com a métrica ETX. [Comsa et al. 2015] apresentaram uma solução que utiliza a métrica de atraso que superou a métrica ETX em baixo atraso na entrega de pacotes. Uma métrica de contagem de nós filhos foi apresentada por [Qasem et al. 2016], solução que superou a métrica ETX junto à MRHOF no balanceamento de carga, no tempo de vida da rede e na taxa de entrega de pacotes. Entre os trabalhos recentes, [Sanmartin et al. 2018] apresentaram uma métrica chamada *Sigma*-ETX, onde o custo foi calculado com base no desvio padrão da métrica ETX ao longo do caminho de roteamento, tal solução superou a métrica ETX junto à MRHOF na taxa de entrega de pacotes, no consumo reduzido de energia, no tempo de vida da rede com a menor latência.

Em geral, os trabalhos relacionados utilizaram o consumo de energia da interface de rede junto ao consumo de energia do microcontrolador para estimar o consumo total de energia do nó. Esse consumo também foi utilizado para calcular a energia residual do nó como métrica de roteamento, exemplos: [Kamgoue et al. 2013] e [Todolí-Ferrandis et al. 2015]. Já no trabalho de [Iova et al. 2015], a quantidade de energia despendida apenas no envio de pacotes fez parte da métrica ELT, a qual foi utilizada para prever o tempo de vida de um nó. Porém, de acordo com o que foi observado até o momento desta pesquisa, o consumo de energia específico da interface de rede em LLNs ainda não foi implementado como uma métrica pura. Assim, este trabalho apresenta esse consumo de energia estimado da interface de rede como uma nova métrica de roteamento simplificada para o RPL.

4. Métrica Proposta

Apresenta-se aqui a EEM (*Energy Estimation Metric*), uma métrica de roteamento baseada na estimativa do consumo de energia da interface de rede. Para estimar tal consumo é possível explorar mecanismos de monitoramento de *hardware*, porém as plataformas recentes para a IoT são de tamanho reduzido e a implementação de mecanismos de monitoramento pode ser custosa e complexa. Para tanto, [Dunkels et al. 2007] apresentaram uma solução alternativa via *software* que, segundo os autores, basta algumas modificações no código-fonte do sistema operacional embarcado para contabilizar o tempo dispensado para a execução do microcontrolador e da interface de rede. É o que apresenta a equação 3, retirada da equação do trabalho de [Dunkels et al. 2007], onde apenas as medidas relacionadas à interface de rede foram extraídas para calcular a EEM.

$$\frac{E_{tr}}{V} = I_t t_t + I_r t_r \quad (3)$$

Na equação 3, em detalhes, o valor de E_{tr} é o consumo total de energia da interface de rede medida em milijoules; V é a tensão da bateria; I_t e t_t são a corrente e o tempo de execução do dispositivo de comunicação no modo de envio de pacotes; e, por fim, I_r e t_r são a corrente e o tempo de execução do dispositivo de comunicação no modo de escuta e recepção de pacotes. Na sequência, a equação 4 apresenta o cálculo da EEM, que é a média aritmética do consumo de energia da interface de rede medida em milijoules por minuto (mJ/m). Considera-se que T é o intervalo de tempo de monitoração em minutos. Portanto, o valor de E_{tr} deve ser o consumo de energia da interface de rede obtido nesse mesmo intervalo de tempo.

$$EEM = \frac{E_{tr}}{T} \quad (4)$$

Nesta pesquisa, a unidade de medida de milijoules por minuto (mJ/m) foi considerada suficiente para a EEM, pois o padrão IEEE 802.15.4 apresenta um consumo energético significativamente reduzido em comparação aos padrões de redes sem fio convencionais, o que resulta em medidas de poucos milijoules por minuto a serem tratadas diretamente como custo de métrica. É importante observar que o 6LoWPAN (RFC 4919), sobre o qual opera o RPL, foi projetado para comunicação sobre redes sem fio IEEE 802.15.4. Além disso, esse consumo reduzido pode ser conferido na documentação (*datasheet*) de diversos dispositivos produzidos para esse tipo de rede, alguns exemplos: [Nordic Semiconductor 2018], [NXP Semiconductors 2018] e [Texas Instruments 2018a]. Apesar de algumas plataformas apresentarem um consumo energético aproximado entre si, esta pesquisa se limitou a avaliar a EEM em LLNs com homogeneidade de *hardware*, assim os demais casos foram deixados para estudos futuros.

Para implementar a EEM, propõe-se aqui uma OF simplificada para realizar uma histerese mínima: a EEM-OF (*Energy Estimation Metric — Objective Function*). A EEM-OF faz a seleção de nó pai preferido de acordo com uma lista de nós pais candidatos. Dois a dois os valores de *rank* dos nós pais candidatos são comparados, e assim se mantém o nó pai preferido aquele que possuir o menor valor de *rank*. Esse processo é similar ao da MRHOF, usa-se a EEM ao invés da métrica ETX e aplica-se a mesma condição da equação 2. Recomenda-se utilizar o valor de limiar mínimo de *pst* de 2 mJ/m, ou seja, uma diferença maior que dois milijoules por minuto são suficientes para a troca de nó pai. Após selecionar o nó pai preferido, a EEM-OF precisa calcular o valor de *rank* conforme a equação 5, onde $Rank_{new}$ é o novo valor de *rank*; $Rank_{base}$ é valor de *rank* de base obtido do nó pai preferido; $Rank_{inc}$ é o valor de incremento que é adicionado a cada salto para evitar laços de roteamento. Recomenda-se que o primeiro valor de *rank* do nó raiz seja $Rank_{base} = 128$, e que o valor de incremento seja $Rank_{inc} = 128$.

$$Rank_{new} = Rank_{base} + Rank_{inc} + EEM \quad (5)$$

Por fim, é necessário que o nó divulgue as suas informações de *rank* e da EEM para os nós vizinhos. Para uma economia de energia é possível divulgar o valor de *rank* conforme a própria equação 5 e dispensar o uso de recipientes (DAGMC). Porém, se houver a necessidade de transportar a métrica por recipientes, será necessário implementar um novo objeto de métrica que suporte no mínimo 16 *bits* para carregar o valor da EEM acumulada.

5. Materiais e Métodos

Para realizar os experimentos desta pesquisa foi reproduzida uma topologia similar à apresentada no documento RFC 6687 [Tripathi et al. 2012], a qual foi implementada no simulador Cooja (Contiki OS Java) — simulador que faz parte do ferramental do sistema operacional embarcado para a IoT: [Contiki OS 2018]. Houve apenas três diferenças básicas entre a implementação da topologia descrita em RFC e a topologia implementada nesta pesquisa: 1) as mensagens de dados foram destinadas apenas para o nó raiz; 2) a carga útil das mensagens de dados foi preenchida apenas o suficiente para evitar a fragmentação; e 3) os percentuais de entrega de pacotes foram coletados de uma base de dados com valores gerados aleatoriamente, uma vez que a base citada em RFC não estava disponível para o acesso público. Para simular os enlaces assimétricos foi utilizado o modelo DGRM (*Directed Graph Radio Medium*). Dentre as plataformas simuladas foi utilizado o TMoteSky, plataforma similar ao TelosB [MEMSIC Semiconductor 2018]. A Tabela 1 resume as demais configurações do ambiente de simulação.

Tabela 1. Configuração do Ambiente de Simulação.

Simulador	Cooja
Modelo de propagação	DGRM
Plataforma	TMoteSky
Sistema operacional	Contiki 2.7
Acesso ao meio	IEEE 802.15.4/CSMA
Ciclo de trabalho (RDC)	ContikiMAC (exceto nó raiz)
Camada de rede	6LoWPAN/RPL
Fim-a-fim	UDP

Assim, para atender ao que está descrito em RFC, o simulador Cooja foi modificado para alterar o percentual de entrega de pacotes entre os nós a cada 10 minutos. Além disso, os parâmetros de uso de espaço de memória pelo RPL também foram modificados: 1) máximo de 16 nós vizinhos; 2) máximo de 44 rotas; e 3) máximo de 16 pacotes enfileirados no nó raiz e 8 pacotes enfileirados nos demais nós. Por fim, foi incluída uma chamada de *watchdog_periodic* na estrutura de repetição da tabela de nós vizinhos, com o intuito de evitar as reinicializações do sistema devido ao tempo de processamento dispensado nesse procedimento.

Tabela 2. Parâmetros Utilizados para Estimar o Consumo de Energia.

Circuito	Corrente	Observações
CPU	330 uA	25°C, 1 MHz, 32768
LPM	2 uA	25°C, 32768 Hz, LPM3
TX	17.4 mA	0 dBm
RX	18.8 mA	—

Para estimar o consumo de energia foi utilizada a equação do trabalho de [Dunkels et al. 2007] junto ao módulo ENERGEST disponível no Contiki. Foram

considerados os parâmetros extraídos da especificação do *chip* de rádio CC2420 [Texas Instruments 2018a] e do microcontrolador MSP430 [Texas Instruments 2018b]. Além disso, foi considerada a tensão de 1,5V conforme baterias AA comuns. A Tabela 2 lista os parâmetros utilizados para estimar o consumo de energia.

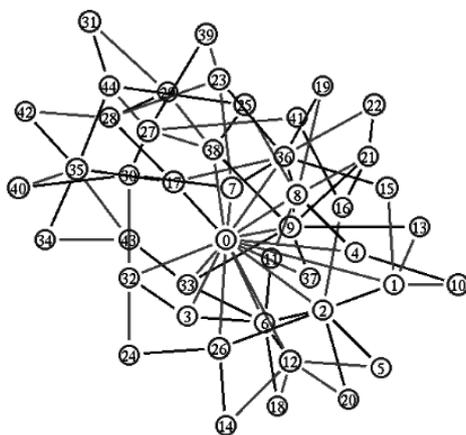


Figura 2. Ilustração da topologia de 45 nós extraída do documento RFC 6687.

Para comparar a EEM com a métrica ETX foi implementado um cenário de 45 nós conforme a topologia ilustrada na Figura 2. O nó identificado por zero foi configurado como o nó raiz. Os enlaces entre os nós foram configurados para o descarte de pacotes de acordo com um percentual de entrega aleatório, entre 30% e 80% — do inglês *Packet Delivery Ratio* (PDR). Além disso, foram criadas 40 sementes de inicialização aleatória, e para cada semente foi gerada uma base de PDRs aleatórias. Para a carga inicial da bateria dos nós foi considerado um milésimo de duas baterias AA comuns, ou seja, aproximadamente 15000 milijoules.

Tabela 3. Parâmetros do Cenário de Simulação

Parâmetros	Valores
Quantidade de nós	45 (1 raiz)
PDR (valores aleatórios)	30–80%
Sementes aleatórias	40
Carga inicial da bateria	15 joules
Tempo de inicialização aleatória	1 segundo
Tempo de convergência RPL	60 segundos
Carga útil da mensagem	20 bytes (sobre UDP)
Intervalo entre mensagens	10, 30, 60, 120 segundos

Antes de enviar as mensagens de dados, os nós foram inicializados aleatoriamente dentro do primeiro tempo de segundo de simulação. Após os 60 segundos iniciais, tempo necessário para a convergência do RPL, os nós começaram a enviar mensagens de 20 bytes sobre UDP para o nó raiz. O intervalo de tempo entre o envio de uma mensagem e outra foi configurada para 10 segundos conforme consta em RFC, porém, também foram realizados experimentos com os intervalos de 30, 60 e 120 segundos. A tabela 3 resume os parâmetros utilizados no cenário de simulação.

Por fim, para a métrica ETX, manteve-se a configuração própria da versão 2.7 do Contiki que busca atender ao documento RFC 6719. Já a EEM foi implementada para ser atualizada de minuto em minuto junto à EEM-OF, conforme a descrição na Seção 4.

6. Resultados dos Experimentos

Esta Seção apresenta os resultados dos experimentos onde foram testadas as duas métricas de roteamento (ETX e EEM), com 40 sementes aleatórias e 4 intervalos de envio pacotes (10, 30, 60 e 120 segundos), totalizando 320 experimentos. Cada um dos pontos dos gráficos apresentados nesta Seção é a média dos resultados de 40 experimentos com o intervalo de confiança de 95% (distribuição *T-Student*). Além disso, os resultados de desempenho apresentados nestes gráficos foram mensurados até a primeira exaustão de um nó (*First Dead Node* — FDN), visando comparar a eficiência energética das métricas.

O gráfico na figura 3 mostra que a EEM prolongou o tempo da vida da rede com um ganho de até 18,5% no intervalo de envio de 10 segundos. Isso mostra que a EEM colaborou com uma melhor distribuição do consumo de energia entre os nós, pois ao estimar o consumo de energia da interface foi possível evitar a seleção de nós pais que mais despendiam de energia. Nota-se também que o ganho foi reduzido na medida em que se aumentava o intervalo de envio de pacotes, isso ocorreu porque esse intervalo foi maior que o intervalo de atualização da EEM (realizada de minuto em minuto), essa é uma situação a ser estudada em futuras melhorias da métrica proposta.

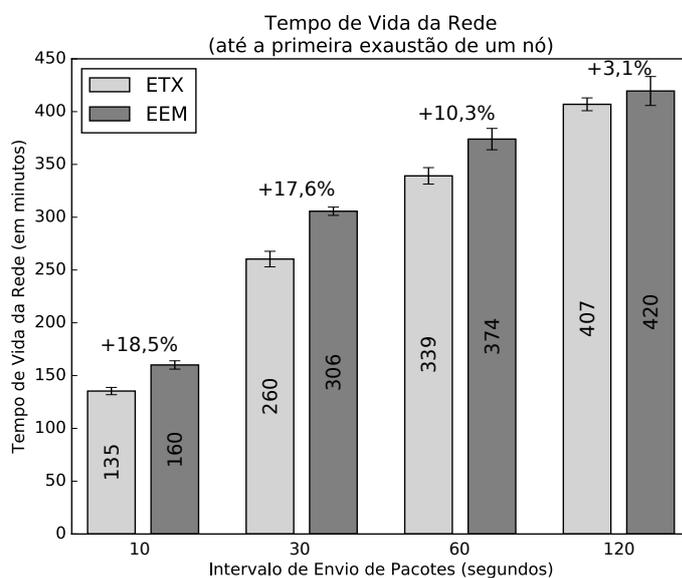


Figura 3. Gráfico do tempo de vida da rede até a primeira exaustão de energia da bateria de um nó.

Já o gráfico na figura 4 apresenta com mais detalhes como o tempo de vida da rede foi prolongado no cenário em que o intervalo de envio de pacotes foi de 10 em 10 segundos, o mesmo intervalo utilizado no documento RFC 6687. É possível observar, conforme indica a seta neste gráfico, que a EEM prolongou o tempo de vida da rede desde a primeira exaustão até a trigésima oitava exaustão de um nó. Nota-se ainda que a terceira exaustão com a EEM ocorreu depois da sétima exaustão com a métrica ETX.

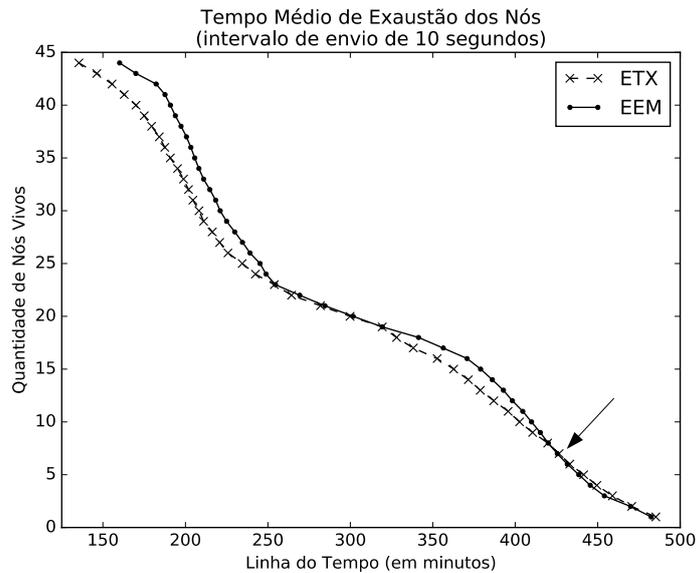


Figura 4. Gráfico do tempo médio de exaustão de energia da bateria de todos os nós no cenário em que o intervalo de envio de pacotes foi de 10 segundos.

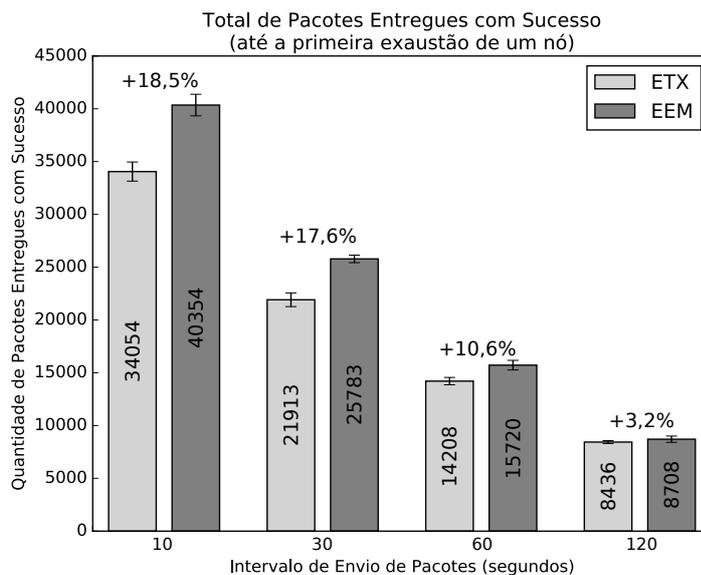


Figura 5. Gráficos do total de pacotes entregues com sucesso ao nó raiz até a primeira exaustão de energia da bateria de um nó.

O gráfico na figura 5 apresenta o total de pacotes que foram entregues com sucesso ao nó raiz. É possível observar que o percentual de ganho na entrega de pacotes é praticamente o mesmo percentual de ganho no tempo de vida da rede apresentado no gráfico da figura 3, o que era de se esperar, pois houve um tempo maior para a rede entregar ainda mais pacotes. No entanto, ao verificar o gráfico na figura 6, nota-se que houve um pequeno ganho na confiabilidade ao considerar apenas a média da taxa de entrega de pacotes, pois houve uma sobreposição nos intervalos de confiança. Assim, pode-se dizer que a EEM colaborou para a escolha de caminhos que levaram a reduzir levemente a

perda de pacotes.

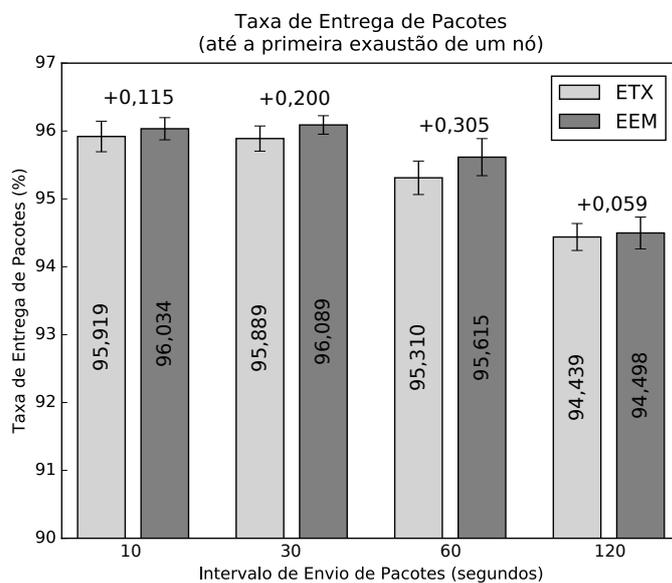


Figura 6. Gráfico da taxa de entrega de pacotes ao nó raiz até a primeira exaustão de energia da bateria de um nó.

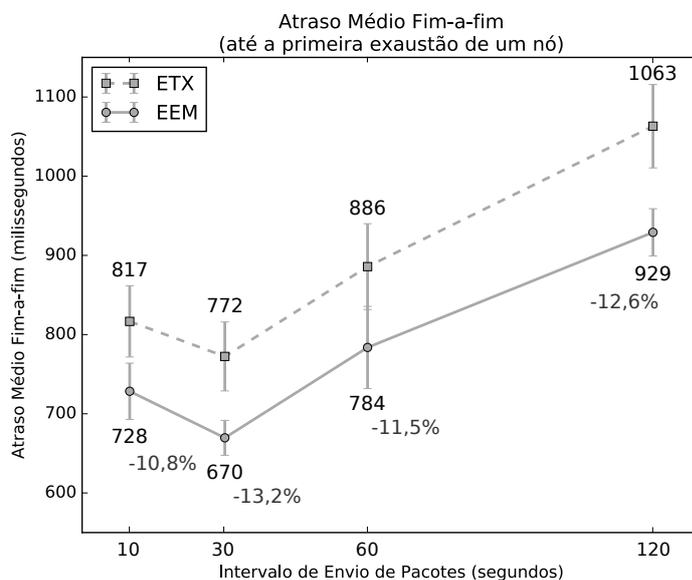


Figura 7. Gráfico do atraso médio fim-a-fim na entrega de pacotes ao nó raiz até a primeira exaustão de energia da bateria de um nó.

Já o gráfico na figura 7 apresenta o atraso médio fim-a-fim na entrega de pacotes, ou seja, o tempo em milissegundos em que um pacote de dados deixou a aplicação do nó de origem e foi entregue com sucesso na aplicação do nó destino. Assim, esses pacotes foram contabilizados independentes da quantidade de saltos que foram necessários para alcançar o nó raiz. Tanto a EEM como a ETX precisaram do volume de tráfego para popularem os seus valores de métrica, assim o menor atraso foi obtido com o menor intervalo de envio e a maior quantidade de pacotes, como pode ser observado nos intervalos de 30,

60 e 120 segundos. Uma exceção ocorreu no atraso obtido no intervalo de envio de 10 segundos, onde o tráfego excessivo de pacotes atingiu a limitação da plataforma simulada e contribuiu para o aumento na latência de roteamento. Dessa maneira, pode-se dizer que a EEM colaborou na seleção de nós pais com a menor sobrecarga e obteve atrasos de até 13,2% a menos do que com a métrica ETX.

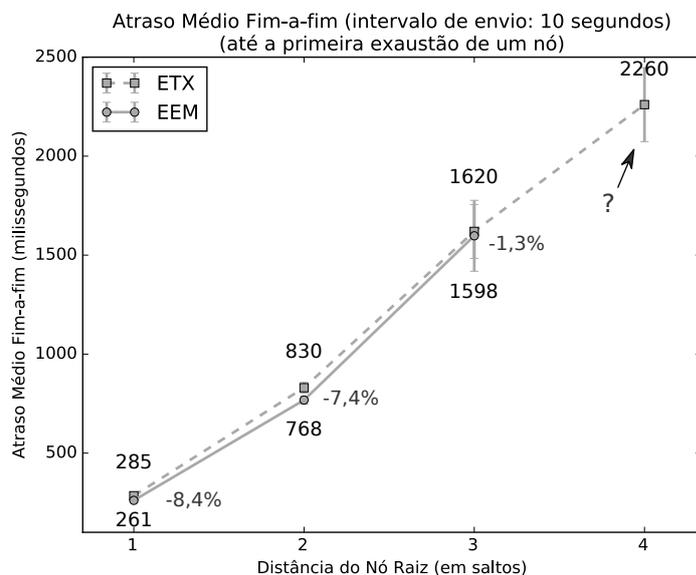


Figura 8. Gráfico do atraso médio fim-a-fim na entrega de pacotes em relação à quantidade de saltos para se alcançar o nó raiz, isso até a primeira exaustão de energia da bateria de um nó. Foi considerado o cenário com o intervalo de envio de pacotes de 10 segundos.

Por fim, o gráfico na figura 8 apresenta com detalhes o atraso médio fim-a-fim obtido no cenário em que o intervalo de envio de pacotes foi de 10 em 10 segundos. Para gerar este gráfico foram contabilizados os pacotes entregues com sucesso e a quantidade de saltos (*hops*) que estes percorreram para chegar até o nó raiz. A EEM superou a métrica ETX ao obter um baixo atraso a um e a dois saltos de distância do nó raiz, a três saltos de distância a EEM obteve um atraso médio menor, mas com sobreposição no intervalo de confiança. Destaca-se, no entanto, a colaboração da EEM na construção de caminhos em que todos os nós estiveram até o máximo de três saltos de distância do nó raiz — é o que indica a seta ilustrada neste gráfico, onde não houve registro de nós a quatro saltos de distância antes da primeira exaustão.

7. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este artigo apresentou uma nova métrica de roteamento denominada EEM, uma métrica que estima o custo do consumo de energia da interface de rede para obter caminhos confiáveis e de baixo consumo energético. Diversos experimentos foram realizados em uma topologia de LLN descrita em RFC e os resultados mostraram que a EEM superou a métrica ETX nas seguintes medidas de desempenho: a) ganhos de até 18,5% no tempo de vida da rede e na quantidade de pacotes entregues com sucesso; b) taxas de entrega de pacotes levemente melhores; e c) atrasos na entrega de pacotes fim-a-fim reduzidos em até 13,2%. Estes resultados mostram que esta é uma solução promissora e que pode ser uma

alternativa à métrica ETX em LLNs, pois além de realizar um melhor balanceamento de carga, possui uma implementação simples que não exige modificações no funcionamento do RPL.

Para trabalhos futuros a EEM precisará de mais testes elaborados para possíveis melhorias. Nas simulações desta pesquisa a atualização da métrica foi realizada de minuto em minuto, portanto outras maneiras de atualização poderão ser exploradas. Além disso, diferentes cenários e topologias precisam ser testados, visto que a topologia utilizada nesta pesquisa não tratou de distância e potência de transmissão entre os nós e nem mesmo de domínios de colisão com vários nós envolvidos. Por fim, em futuras implementações, a EEM poderá ser combinada com outras métricas para o comparativo entre funções objetivas, ou ainda, a incorporação da EEM em métricas compostas também poderá ser objeto de estudo para melhorar o roteamento e a eficiência energética em LLNs.

Para fins de pesquisa, o código-fonte dos nós, as modificações realizadas no simulador, as topologias e os resultados dos experimentos foram disponibilizados em [UTFPR 2019].

Referências

- Comsa, A., Ivanciu, I., Luchian, E., Dobrota, V., and Steenhaut, K. (2015). End-to-end Delay Minimization in an Application-aware Routing for Wireless Sensor Networks. In *2015 14th RoEduNet International Conference - Networking in Education and Research (RoEduNet NER)*, pages 80–84.
- Contiki OS (2018). Contiki: The Open Source OS for the Internet of Things. (<http://www.contiki-os.org>).
- De Couto, D. S. J., Aguayo, D., Bicket, J., and Morris, R. (2003). A High-throughput Path Metric for Multi-hop Wireless Routing. In *Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '03*, pages 134–146, New York, NY, USA. ACM.
- Dunkels, A., Osterlind, F., Tsiftes, N., and He, Z. (2007). Software-based On-line Energy Estimation for Sensor Nodes. In *Proceedings of the 4th Workshop on Embedded Networked Sensors, EmNets '07*, pages 28–32, New York, NY, USA. ACM.
- Gnawali, O. and Levis, P. (2012). The Minimum Rank with Hysteresis Objective Function. RFC 6719.
- Gonizzi, P., Monica, R., and Ferrari, G. (2013). Design and Evaluation of a Delay-efficient RPL Routing Metric. In *2013 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pages 1573–1577.
- Iova, O., Theoleyre, F., and Noel, T. (2015). Using Multiparent Routing in RPL to Increase the Stability and the Lifetime of the Network. *Ad Hoc Netw.*, 29(C):45–62.
- Kamgueu, P. O., Nataf, E., Djotio Ndié, T., and Festor, O. (2013). Energy-based routing metric for RPL. Research Report RR-8208, INRIA.
- Kim, H., Ko, J., Culler, D. E., and Paek, J. (2017). Challenging the IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL): A Survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 19(4):2502–2525.

- Kushalnagar, N., Montenegro, G., and Schumacher, C. (2007). IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals. RFC 4919.
- MEMSIC Semiconductor (2018). TelosB Mote Platform. (http://www.mem-sic.com/userfiles/files/Datasheets/WSN/telosb_datasheet.pdf).
- Nordic Semiconductor (2018). nRF52840 Advanced multi-protocol System-on-Chip Supporting: Bluetooth low energy (Bluetooth 5), ANT/ANT+, 802.15.4 and 2.4GHz proprietary. (http://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF52840_PB_v1.0.pdf).
- NXP Semiconductors (2018). MCR20AVHM Data Sheet Low power, high-performance 2.4 GHz IEEE 802.15.4 compliant transceiver with connectivity. (<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MCR20AVHM.pdf>).
- Qasem, M., Al-Dubai, A., Romdhani, I., Ghaleb, B., and Gharibi, W. (2016). A New Efficient Objective Function for Routing in Internet of Things Paradigm. In *2016 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*.
- Sanmartin, P., Rojas, A., Fernandez, L., Avila, K., Jabba, D., and Valle, S. (2018). Sigma Routing Metric for RPL Protocol. *Sensors*, 18(4).
- Texas Instruments (2018a). CC2420 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / Zigbee-ready RF Transceiver. (<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>).
- Texas Instruments (2018b). MSP430F15x, MSP430F16x, MSP430F161x Mixed Signal Microcontroller. (<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f1611.pdf>).
- Thubert, P. (2012). Objective Function Zero for the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL). RFC 6552.
- Todolí-Ferrandis, D., Santonja-Climent, S., Sempere-Payá, V., and Silvestre-Blanes, J. (2015). RPL routing in a real life scenario with an energy efficient objective function. In *2015 23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*, pages 285–288.
- Tripathi, J., de Oliveira, J. C., and Vasseur, J. (2012). Performance Evaluation of the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL). RFC 6687.
- UTFPR (2019). UTFPR-GP - Pesquisa em Internet das Coisas - Implementações, Dados e Resultados (<https://research.gp.utfpr.edu.br/iot/sbrc2019/>).
- Vasseur, J., Kim, M., Pister, K., Dejean, N., and Barthel, D. (2012). Routing Metrics Used for Path Calculation in Low-Power and Lossy Networks. RFC 6551.
- Winter, T., Thubert, P., Brandt, A., Hui, J., Kelsey, R., Levis, P., Pister, K., Struik, R., Vasseur, J., and Alexander, R. (2012). RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks. RFC 6550.
- Xiao, W., Liu, J., Jiang, N., and Shi, H. (2014). An Optimization of the Object Function for Routing Protocol of Low-power and Lossy Networks. In *The 2014 2nd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI 2014)*, pages 515–519.
- Yang, X., Guo, J., Orlik, P., Parsons, K., and Ishibashi, K. (2014). Stability metric based routing protocol for low-power and lossy networks. In *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 3688–3693.