

Adaptação do Protocolo RPL para Aplicações com Mobilidade

João Gabriel Pazinato de Bittencourt e Carlos Marcelo Pedroso

Resumo— Este trabalho visa adaptar o RPL para cenários de mobilidade urbana através da proposta de métrica de roteamento e função objetivo novas, com as quais se objetivou prever o movimento dos nós de modo a estabelecer rotas mais estáveis. O desempenho da proposta foi comparado com o do protocolo original via simulações computacionais, baseadas em *traces* reais do movimento de veículos em um ambiente urbano. A partir disto, observou-se uma melhora da taxa de entrega de pacotes e atraso fim a fim médios, assim como uma redução da quantidade média de trocas de pai na árvore de roteamento.

Palavras-Chave— RPL, Mobilidade, Internet das Coisas, Roteamento.

Abstract— This article presents an adaptation of RPL for urban mobility scenarios through a new routing metric and objective function, which had the goal of predicting the movement of nodes in order to establish more stable routes. The performance of the proposed contributions was compared with that of the original protocol through computational simulations based on real traces of vehicle movement in an urban area. As a result, improvements in packet delivery ratio and average end-to-end delay were observed, as well as a reduction of the average number of parent switches in the routing tree.

Keywords— RPL, Mobility, Internet of Things, Routing.

I. INTRODUÇÃO

Abordagens e soluções baseadas em Internet das Coisas (IoT, ou *Internet of Things*) encontram ampla adoção em diversas áreas. Estima-se que existirão cerca de 19,2 bilhões de dispositivos compondo redes de IoT até o fim de 2024 [1], divididos entre aplicações em cidades inteligentes, agricultura de precisão, indústria, saúde, entre outras. Destaca-se, em particular, o potencial de crescimento da utilização destas redes em contextos de mobilidade, como peça fundamental para viabilizar a comunicação entre máquinas, o rastreamento de ativos, veículos e/ou pessoas, dentre outros exemplos.

Desde a sua concepção, em 2012 [2], o RPL (*Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*) vem recebendo bastante atenção da comunidade acadêmica [3], e é considerado o protocolo padrão para roteamento em redes de IoT [4]. Ele foi projetado para contemplar redes com restrições de consumo de energia e sujeitas a variações de qualidade de canal. O RPL oferece mecanismos para propiciar flexibilidade na construção de rotas segundo as necessidades da aplicação. Por exemplo, a Função Objetivo (FO) possibilita definir a maneira que as rotas são formadas na rede, de acordo com uma ou mais métricas a serem minimizadas ou maximizadas, como a carga das baterias, latência e/ou número de saltos.

João Gabriel Pazinato de Bittencourt e Carlos Marcelo Pedroso, Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR, Curitiba-PR, e-mail: joabittencourt@ufpr.br, carlos.pedroso@ufpr.br.

Contudo, sabe-se que a versão padrão deste protocolo exhibe um desempenho insatisfatório para casos envolvendo mobilidade. O RPL foi desenvolvido para redes estáticas, e redundante na formação de topologias instáveis e perdas de pacotes de dados nos cenários em questão [5]. Como resposta, trabalhos acadêmicos recentes [6], [7], [8] propuseram adaptações de tal protocolo tendo em vista melhorar o seu desempenho.

Kharrufa *et al.* [3] e Shah *et al.* [5] elencam soluções cujo foco é a melhoria de desempenho do RPL em redes com mobilidade. Nota-se que o conjunto de métricas utilizado pelas FOs propostas é comumente limitado ao número de saltos, indicadores da qualidade do enlace (como o RSSI, ou *Received Signal Strength Indicator*) e distância euclidiana entre os nós. No entanto, abordagens que visam orientar a seleção de rotas com base em métricas invariantes no tempo – que refletem a estabilidade dos enlaces e portanto permitem formar rotas mais duradouras e reduzir os *handoffs* na rede – são negligenciadas.

Adicionalmente, o meio urbano pode ser beneficiado pelo desenvolvimento de uma FO capaz de realizar previsão de movimento e selecionar rotas mais estáveis. Em particular, esta inovação pode habilitar aplicações no campo de Internet dos Veículos (IoV, *Internet of Vehicles*), como a coleta de dados da saúde de condutores para gerar alertas de emergência ou a gestão de frotas de transportes [9].

Este artigo explora tal lacuna no estado da arte, tendo em vista produzir uma solução que possui aplicabilidade em meios urbanos. Uma nova FO foi desenvolvida, que utiliza a variação do RSSI ao longo do tempo visando tirar proveito da previsibilidade da mobilidade urbana e trazer uma melhoria de estabilidade e desempenho do roteamento. Ademais, este projeto mantém compatibilidade com o protocolo original, o que proporciona a interoperabilidade com outras redes e dispositivos que o implementam.

As contribuições deste trabalho são: (i) desenvolver uma nova métrica de roteamento calculada a partir do RSSI, capaz de capturar a magnitude e direção de movimento relativo entre os dispositivos da rede e prever seus valores futuros; (ii) promover adaptações à FO, de modo a adequar o protocolo RPL à nova métrica, assim como melhorar a estabilidade do roteamento em contextos envolvendo mobilidade urbana; (iii) realizar a implementação da proposta no Sistema Operacional Contiki-NG (*Contiki Next Generation*), e disponibilizá-la à comunidade acadêmica¹. (iv) avaliar o desempenho da proposta através de simulações computacionais executadas no ambiente Cooja, comparando-a com o protocolo original em cenários baseados em *traces* reais de mobilidade.

A avaliação de desempenho foi conduzida a partir de

¹<https://github.com/Joaogbr/contiki-ng-MvmtOF>

simulações computacionais, nas quais o movimento dos nós foi baseado em *traces* reais de mobilidade. Os resultados obtidos demonstram a eficácia da proposta na redução das trocas de pai e, conseqüentemente, no aumento da estabilidade na rede. Isto, por vez, ocasionou uma melhoria da taxa de entrega de pacotes e do atraso fim a fim médios.

Além desta introdução, o artigo está organizado em mais quatro seções. Na seção II, encontram-se a fundamentação teórica, que inclui descrições sobre os principais aspectos do protocolo RPL e o estado da arte. A seção III detalha as contribuições do projeto, ou seja, as adaptações feitas aos mecanismos do RPL. A seção IV mostra os resultados alcançados a partir do que foi documentado na anterior. Por fim, as conclusões são apresentadas na seção V.

II. EMPREGO DO RPL EM CENÁRIOS COM MOBILIDADE

O RPL é um protocolo de roteamento do tipo vetor de distância, projetado para redes LLN (*Low-Power and Lossy Networks*) que operam com IPv6 (*Internet Protocol version 6*) [2]. As topologias criadas pelo RPL são compostas por DODAGs (*Destination Oriented Directed Acyclic Graphs*) – grafos em forma de árvore cujos percursos convergem em um único ponto, equivalente ao nó raiz.

Um dispositivo pode ingressar em um DODAG ao encontrar um nó já pertencente a ele. Isto pode ocorrer se o primeiro receber a mensagem de controle DIO (*DODAG Information Object*) do último, cuja periodicidade é governada pelo algoritmo Trickle do RPL. Alternativamente, a mensagem DIS (*DODAG Information Solicitation*) pode ser transmitida para que um DIO seja enviado em resposta por um nó integrante próximo. Por fim, o dispositivo passa a fazer parte do DODAG ao transmitir a mensagem DAO (*Destination Advertisement Object*) ao nó do qual recebeu o DIO, e este passa a atuar como pai, intermediando a comunicação daquele com a raiz.

A. Função Objetivo

A FO estabelece matematicamente, a partir de uma ou mais métricas de roteamento, um critério a ser otimizado durante a escolha de nós pai no processo de formação do DODAG. Segundo as especificações, o protocolo RPL deve oferecer ao menos uma FO, denominada OF0 (*Objective Function Zero*): uma opção básica que estabelece rotas sem garantir que estas serão ótimas de acordo com métricas de roteamento específicas [10]. Contudo, a MRHOF (*Minimum Rank with Hysteresis Objective Function*) [11], que permite a otimização de métricas e evita trocas excessivas de pais através de um mecanismo de histerese, é mais utilizada e constitui a opção pré-habilitada no código base do Contiki-NG. Por padrão, esta FO utiliza o ETX (*Expected Transmission Count*) – uma métrica estatística, equivalente à quantidade estimada de transmissões necessárias para que um pacote seja entregue ao destino. No entanto, é possível utilizá-la com outras métricas como o atraso ou RSSI.

B. Adaptações do RPL para mobilidade

A proposta de Murali e Jamalipour [6] foi o desenvolvimento de dois algoritmos. O primeiro destes representa um

método de escolha do nó pai a partir de uma MRHOF modificada, que recebe quatro métricas: ETX, *Expected Lifetime* (ELT) – uma estimativa do tempo de vida dos nós –, RSSI e distância euclidiana entre dispositivos. Um subgrupo de “pais preferidos” é formado a partir dos vizinhos conhecidos, com base na minimização da pontuação (calculada a partir do ETX) e da distância, sendo que a primeira métrica recebe prioridade. Do subgrupo é eleito como pai o nó que apresenta menor ETX, maior ELT e maior RSSI, em ordem de prioridade decrescente. Adicionalmente, candidatos estáticos recebem maior preferência durante a seleção. O segundo ajusta dinamicamente os intervalos do *timer* de Trickle com base no número de nós vizinhos conhecidos, sendo mais curtos caso este esteja abaixo de um limiar. As simulações foram feitas com base no modelo de mobilidade *Random Waypoint*. A proposta apresentou um ganho de PDR entre 20,3% e 21,3% relativo ao RPL original². O valor de atraso médio foi reduzido em 29%.

Mohammadsalehi *et al.* [7] argumentam que métricas como RSSI e ETX não são adequadas em cenários com mobilidade, por se tornarem variantes no tempo. A métrica proposta pelo trabalho foi o *Time To Reside* (TTR), que exprime o tempo remanescente estimado de um enlace, calculada a partir das coordenadas geográficas e velocidade dos nós. O trabalho também propõe dispositivos “âncora”, totalmente estáticos e que levam precedência durante a seleção de pai. Para efetuar a validação, simulações foram feitas utilizando-se os modelos de mobilidade *Random Walk* e *Manhattan* [12]. Os resultados obtidos apontam um ganho de PDR de até 33% relativo a Murali e Jamalipour [6], e de até 42% relativo à versão original do RPL. Contudo, é válido ressaltar que a dependência do posicionamento geográfico para o cálculo da métrica pode configurar um entrave à implementação, já que em prática impõe um requerimento de módulos GPS aos dispositivos.

Hongchan Kim, Hyung-Sin Kim, e Bahk [8] propuseram três extensões ao RPL: mecanismos de (i) detecção de mobilidade e (ii) gerenciamento de enlaces, e (iii) uma nova FO. Considerando-se (iii), os autores utilizaram a ordem de movimento (se o candidato é estático ou móvel), o número de saltos e RSSI como fatores na seleção do pai. Nós móveis e estáticos a realizam com prioridades diferentes, dando maior importância ao RSSI e à ordem de movimento, respectivamente. A disponibilidade de vizinhos é estimada com base em um *timer* dinâmico, cuja duração é calculada em função da ordem de mobilidade destes. Por fim, (i) é realizado a partir da média móvel dos intervalos entre trocas de pai: se um nó descobre que este valor está abaixo de um limiar, ele se considera em movimento e informa os vizinhos. A avaliação de desempenho foi realizada através de testes em campo e simulações. No primeiro caso, uma rede foi formada por 34 nós, três dos quais eram móveis e seguiam um trajeto fixo com velocidade de 0,4 m/s. As simulações foram separadas em dois cenários: o primeiro foi composto por 14 dispositivos, sendo apenas um móvel e que seguiu um percurso pré-determinado a uma velocidade constante, sendo 5 m/s o maior valor testado. O último consistiu em seis nós estáticos e até 18 nós móveis,

² O termo “RPL original” refere-se à configuração que seleciona a MRHOF e o ETX como FO e métrica de roteamento, respectivamente.

cujo comportamento foi definido pelo modelo de mobilidade *Random Waypoint* [12] e cujas velocidades variaram entre 0,5 e 2 m/s. Comparada ao RPL original, considerando-se apenas os nós móveis, a proposta denotou um ganho de PDR de 9,61% nos testes em campo, 40% no primeiro cenário de simulação para 5 m/s e 50% no segundo para 18 nós móveis.

As simulações conduzidas pelos trabalhos mencionados foram realizadas no ambiente Cooja utilizando-se modelos de mobilidade, nenhum dos quais descreve o movimento – seja de veículos ou pessoas – de forma realista [12]. Logo, destaca-se a importância da adoção de *traces* de mobilidade coletados em campo para a avaliação do desempenho de novas soluções. A Tabela I oferece uma comparação dos resultados dos trabalhos.

TABELA I
RESULTADOS DOS TRABALHOS APRESENTADOS

Trabalho	Avaliação de desempenho	Modelo de movimento	Ganho de PDR
Murali e Jamalipour [6]	Simulações	<i>Random Waypoint</i>	20,3 a 21,3%
Mohammadsalehi et al. [7]	Simulações	<i>Random Walk e Manhattan</i>	42%
Hongchan Kim, Hyung-Sin Kim e Bahk [8]	Simulações e testes em campo	<i>Random Waypoint</i>	40% a 50% (simulações) 9,61% (campo)

III. MÉTODO PROPOSTO

O método foi composto por três partes. Primeiramente, a definição de uma nova métrica de roteamento projetada para cenários de mobilidade; em seguida, o desenvolvimento de uma FO capaz de estabelecer e manter rotas estáveis no DODAG e, por fim, a proposta de modificações ao mecanismo de *probing* de modo a adequá-lo à nova métrica.

A. Formulação da Métrica de Roteamento

Uma vez que valores de RSSI formam a base para o cálculo da nova métrica, deve-se explicar como estes são filtrados. Por padrão, o Contiki-NG emprega alisamento exponencial (*Exponentially Weighted Moving Average*, ou EWMA) sobre as medições após cada recepção, de modo a mitigar os efeitos de interferência. O resultado alisado é obtido conforme:

$$\rho_i^s = \alpha \rho_{i-1}^s + (1 - \alpha) \rho_i, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (1)$$

sendo ρ_i e ρ_i^s o RSSI medido e o resultado alisado (em dBm) no instante i , e α o peso das observações passadas.

O uso do EWMA é adequado apenas caso os nós sejam estáticos, já que α é constante e independe do intervalo entre as medições. Isto tem o efeito de filtrar as variações do RSSI causadas pelo movimento assim como as decorrentes de interferências. Portanto, o EWMA foi substituído pela técnica de alisamento *Exponential Moving Average with Next Point Interpolation* (EMAnext) [13], cujo α é calculado conforme:

$$\alpha = \exp(-(t_i - t_{i-1})/\tau) \quad (2)$$

sendo t_i o instante da última recepção e τ a dimensão da janela de tempo a ser considerada no cálculo do α .

A FO utiliza a métrica de roteamento para representar custos de enlace e, por conseguinte, identificar os custos de percurso e escolher as rotas ótimas. Para obter melhor desempenho em contextos envolvendo mobilidade, é desejável que esta reflita a magnitude do movimento relativo entre os nós e tenha baixa variação ao longo do tempo [7], visando a formação de rotas estáveis e duradouras. Por esta razão, uma nova métrica nomeada Fator de Movimento (FM) foi adotada, dada por:

$$\sigma_i = \begin{cases} \phi_i(1 + \ln(1 + \omega_i/\phi_i)), & \text{se } \omega_i/\phi_i > 0 \\ \phi_i, & \text{se } 0 \geq \omega_i/\phi_i > -0,25 \\ -\phi_i, & \text{se } -0,25 \geq \omega_i/\phi_i > -1 \\ \omega_i, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3)$$

sendo σ o FM. A variável ϕ_i é definida da seguinte maneira:

$$\phi_i = (\Delta\rho^s)/(\Delta t) = (\rho_i^s - \rho_{i-1}^s)/(t_i - t_{i-1}) \quad (4)$$

Por fim, a definição de ω é dada a seguir:

$$\omega_i = (\Delta\phi)/(\Delta t) = (\phi_i - \phi_{i-1})/(t_i - t_{i-1}) \quad (5)$$

A variável ω é considerada no cálculo do FM somente se houver medições de RSSI suficientes (ao menos três) para obtê-la. Conforme (3), um fator logarítmico é calculado com base em ω para multiplicar ϕ se ambas variáveis possuírem o mesmo sinal. Caso contrário, FM será equivalente a ϕ , $-\phi$ ou ω a depender do valor da razão ω/ϕ . É importante notar que uma analogia pode ser feita entre estas duas variáveis e a velocidade e aceleração de um objeto.

O custo de percurso de uma rota equivale à soma dos custos dos enlaces que a compõem. Por extensão, uma métrica de roteamento deve apresentar valores exclusivamente positivos, de outro modo haveria enlaces que reduzem o custo de percurso. O FM, contudo, pode ser negativo, o que exige que apenas o seu módulo seja considerado neste cálculo. De qualquer forma, o sinal traz consigo um significado: se positivo, indica que os nós estão se aproximando; se negativo, que estão se afastando. Logo, concluiu-se que ele deve influenciar o processo de seleção do pai, descrito na subseção III-B.

B. Desenvolvimento da Função Objetivo

A nova FO foi elaborada tendo em vista melhorar a estabilidade de roteamento em cenários com mobilidade; ou seja, o seu propósito é ocasionar a seleção de rotas mais duradouras, o que reduz a quantidade de trocas de pai pelos nós assim como a latência e a perda de pacotes. Em suma, a FO é regida por dois princípios de operação: ela procura estabilidade quando o nó não possui ou necessita trocar de pai, e a mantém quando possui um pai com características aceitáveis.

O Algoritmo III.1 apresenta o pseudocódigo da FO. A função “BestParent” recebe candidatos a pai como entrada, os avalia sob um conjunto de critérios, e retorna o melhor. O primeiro trecho (linhas 10 a 12) diz respeito à manutenção de estabilidade. Caso um dos candidatos já seja o pai utilizado pelo nó e possua características aceitáveis de custo de percurso, magnitude de movimento (módulo do FM) e intensidade de sinal (RSSI), a função o retorna e a rota é mantida.

Algoritmo III.1: Pseudocódigo da FO proposta

```

1 Defina:
2  $PCOST\_THRESH \Rightarrow$  Threshold do custo de percurso;
3  $PCOST\_MAX \Rightarrow$  Máximo custo de percurso aceitável;
4  $LCOST\_MAX \Rightarrow$  Máximo custo de enlace aceitável;
5  $ARSSI\_MAX \Rightarrow$  Máximo RSSI absoluto aceitável;
6  $cset \Rightarrow$  Conjunto de candidatos;
7  $prefpar \Rightarrow$  Nó pai atual;
8  $bestc \Rightarrow$  Melhor candidato;
9 Função BestParent ( $cset, prefpar$ ):
10 if  $prefpar \neq NULL$  and
     $prefpar.pcost \leq PCOST\_MAX$  and
     $|prefpar.lcost| \leq LCOST\_MAX$  and
     $|prefpar.lastrssi| \leq ARSSI\_MAX$  then
11     return  $prefpar$ ;
12 end
13  $bestc \leftarrow NULL$ ;
14 for  $c$  in  $cset$  do
15      $bestc \leftarrow bestc == NULL ? c : bestc$ ;
16     if  $c.pcost < bestc.pcost + PCOST\_THRESH$  and
         $c.pcost > bestc.pcost - PCOST\_THRESH$  then
17          $bestc\_rrssi \leftarrow bestc.lcost \geq 0 ?$ 
             $ARSSI\_MAX + |bestc.lastrssi| :$ 
             $ARSSI\_MAX + bestc.lastrssi$ ;
18          $c\_rrssi \leftarrow c.lcost \geq 0 ?$ 
             $ARSSI\_MAX + |c.lastrssi| :$ 
             $ARSSI\_MAX + c.lastrssi$ ;
19          $bestc \leftarrow c\_rrssi > bestc\_rrssi ? c : bestc$ ;
20     else
21          $bestc \leftarrow c.pcost < bestc.pcost ? c : bestc$ ;
22     end
23 end
24 return  $bestc$ ;
    
```

Relativo ao restante da função (busca por estabilidade), executado sob a condição de o pai atual não existir ou apresentar características insatisfatórias, os candidatos são testados sob uma ordem de relações, em conformidade com as especificações do RPL [2]: se dois forem equivalentes sob a mesma relação, testar a próxima na sequência; caso contrário, escolher o melhor (linhas 16 a 22). Na condição de os candidatos obtiverem resultados similares para a primeira relação (custo de percurso), eles serão considerados equivalentes. Em seguida, uma estimativa da quantidade de RSSI remanescente (RRSSI) até a falha do enlace, calculada a partir do sinal do FM e da última medição de RSSI, será a relação testada.

C. Mecanismo de Probing

Dado que o FM é baseado nas amostras de RSSI, torna-se importante estabelecer uma garantia de que os valores de um candidato a pai estejam atualizados. O Contiki-NG fornece um mecanismo de *probing*, distinto do algoritmo Trickle, que periodicamente escolhe um nó vizinho como alvo, e transmite uma sonda em seguida de modo a monitorar a qualidade do enlace correspondente. Por padrão, mensagens DIO são enviadas para que o ETX possa ser aferido. Em contrapartida, de modo a adequar este mecanismo ao presente trabalho, as mensagens DIS são utilizadas. Desta forma, os nós vizinhos respondem com DIOs assim que possível, e os valores de RSSI podem ser registrados após a recepção. Uma vez que o cálculo da métrica FM exige múltiplos destes, maior preferência é

dada a dispositivos com medições de RSSI insuficientes ou pouco recentes na escolha do alvo, e o intervalo de *probing* é reduzido pela metade nestes casos para que a métrica seja atualizada rapidamente. Ademais, o nó pai é escolhido como alvo com mais frequência que os restantes.

IV. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Esta seção tem o propósito de explicar as métricas de desempenho escolhidas para a avaliação, expor os resultados obtidos para o cenário de testes concebido e providenciar uma interpretação no que tange o desempenho da proposta.

A. Métricas de Desempenho

O desempenho da proposta durante os testes foi avaliado segundo as métricas elencadas a seguir, calculadas a partir da análise dos resultados das simulações: (i) atraso fim a fim médio, em segundos; (ii) *jitter* fim a fim, em segundos [14]; (iii) PDR fim a fim, obtido por $PDR = 100(\eta_{rx}/\eta_{tx})$, sendo η_{rx} e η_{tx} o total de mensagens recebidas e transmitidas; (iv) quantidade média de trocas de pai, utilizada como maneira de aferir a estabilidade das rotas.

Para possibilitar a generalização das conclusões, uma análise estatística dos resultados relativos a cada métrica foi feita utilizando-se intervalos de confiança de 95%.

B. Descrição do Cenário de Testes

De modo a estabelecer uma base de comparação de desempenho, tanto a proposta quanto a versão original do RPL (empregando o MRHOF nas configurações padrão como FO e o ETX como métrica) foram consideradas. Em ambos os casos, os intervalos mínimo e máximo do envio das mensagens DIO foram de 4,096 e 1.048,576 segundos. O tempo de simulação foi limitado a uma hora, e cada teste foi repetido dez vezes para que se pudesse obter os intervalos de confiança.

C. Cenário de Testes: Mobilidade em Meio Urbano Realista

O desempenho da proposta pode ser melhor aferido ao se considerar cenários urbanos realistas. Bonola *et al.* [15] coletaram dados sobre as trajetórias de táxis na cidade de Roma. Os *traces* disponíveis contêm informações sobre a movimentação de 320 veículos durante um mês, cujas posições eram atualizadas a cada sete segundos. A velocidade média observada foi de 31,9 km/h (8,86 m/s), compatível com um meio urbano típico. Dada a alta taxa de amostragem do posicionamento assim como a grande quantidade de dados disponíveis, tal *dataset* foi escolhido para a criação dos testes.

O cenário de testes foi construído com um *subset* de 21 nós (incluindo a raiz). Os táxis foram selecionados com base na proximidade dos seus centros de massa individuais, que equivalem à média de todas as posições de um elemento dentro de um período de observação [16], a um ponto de referência central. Este, por vez, foi calculado a partir do centro de massa de todos os *traces*, e é onde a raiz foi situada. A Tabela II lista os parâmetros de simulação do cenário. Em seguida, a Tabela III mostra os resultados referentes ao PDR, atraso e *jitter* fim a

TABELA II
 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO DO CENÁRIO DE TESTES

Parâmetro	Cenário
Número de nós raiz	1
Número de nós transmissores	20
Número de nós móveis	20
Velocidade média dos nós móveis	8,86 m/s
Alcance de transmissão	1.400 m
Tamanho das mensagens	71 bytes
Intervalo entre mensagens	0,5 s
Intervalo mínimo DIO	4,096 s
Intervalo máximo DIO	1.048,576 s
Taxa de amostragem do posicionamento	7 s
Duração das simulações	3.600 s

 TABELA III
 RESULTADOS DO CENÁRIO DE TESTES

Métrica de desempenho	RPL original	Proposta	Ganho médio
η_{tx}	98134,20 ± 3239,91	134700,10 ± 62,50	37,26%
η_{rx}	28128,20 ± 3905,25	73991,20 ± 3149,80	163,05%
PDR	27,86 ± 3,74%	54,50 ± 2,31%	26,64%
Trocas de pai	112,47 ± 11,93	3,96 ± 0,48	96,48%
Atraso médio	291,60 ± 9,72 ms	232,99 ± 28,22 ms	20,1%
Jitter	183,47 ± 18,85 ms	179,84 ± 29,58 ms	1,98%

fim médios e quantidade média de trocas de pai, sendo também exibidas as margens de erro para 95% de confiança.

Verifica-se que a quantidade média de trocas de pai foi reduzida em 96,5%, o que decorre da seleção de rotas mais duradouras propiciada pela proposta. Esta redução também significou que a transferência de pacotes pôde ocorrer com menos falhas de enlace na rede, o que redundou não somente em um aumento do PDR, de cerca de 26,5%, como da quantidade total de mensagens transmitidas e recebidas, respectivamente em 37% e 163%. O atraso fim a fim médio também apresentou uma redução, de 20%, o que é esperado ao se diminuir a frequência de *handoffs* na rede, e portanto os intervalos de tempo nos quais os pacotes não podem ser encaminhados.

Em relação aos trabalhos relacionados, a proposta apresentou um ganho de PDR relativo ao MRHOF original maior que Murali e Jamalipour [6], porém menor que Mohammadsalehi *et al.* [7] e Hongchan Kim, Hyung-Sin Kim, e Bahk [8]. É importante reiterar que os testes com *traces* reais de mobilidade possuem maior taxa de transmissão, velocidade e distância entre os nós quando comparados com os cenários desenvolvidos para avaliação de desempenho pelos métodos concorrentes. Também se deve considerar que a proposta não fez uso de nós estáticos para encaminhar pacotes e auxiliar o roteamento, diferentemente dos demais métodos.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho objetivou desenvolver de uma nova Função Objetivo, que considera a previsibilidade do movimento urbano para melhorar o desempenho do protocolo RPL em aplicações de IoT neste contexto. Para avaliar o desempenho da proposta, testes foram planejados e executados, visando analisá-lo sob um conjunto de métricas. Os resultados mostram que a proposta reduziu efetivamente a quantidade de trocas de pai em comparação com o RPL original, proporcionando maior

estabilidade à rede. Ademais, tal contribuição foi acompanhada por uma diminuição do atraso e um aumento do PDR fim a fim médios. Em suma, os resultados demonstram a capacidade da proposta de prover uma melhoria de desempenho ao protocolo RPL em cenários de mobilidade urbana.

A. Contribuições Futuras

A acurácia da FO pode ser ampliada ao se incorporar abordagens de inteligência artificial, como a lógica *Fuzzy* [17], para a seleção do nó pai. Uma base de regras pode ser criada para variáveis linguísticas, obtidas a partir da definição de conjuntos nebulosos para os valores da métrica FM (baixa, média, alta) e do RSSI (ótimo, bom, ruim e muito ruim). Ademais, técnicas de previsão para séries temporais irregulares, como o alisamento exponencial de Holt [18], podem ser utilizadas para capturar com mais exatidão o comportamento do movimento ao longo do tempo, o que tem o potencial de antecipar falhas de enlace e elevar o desempenho da proposta.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Hasan, "State of IoT 2023: Number of connected IoT devices growing 16% to 16.7 billion globally," maio 2023, Acesso em: 09-01-2024. Disponível em: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices>
- [2] R. Alexander *et al.*, "RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks," RFC 6550, mar. 2012.
- [3] H. Kharrufa, H. A. A. Al-Kashoash, e A. H. Kemp, "RPL-Based Routing Protocols in IoT Applications: A Review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 15, pp. 5952–5967, 2019.
- [4] O. Iova *et al.*, "RPL: The Routing Standard for the Internet of Things... Or Is It?" *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, pp. 16–22, 2016.
- [5] Z. Shah *et al.*, "Routing Protocols for Mobile Internet of Things (IoT): A Survey on Challenges and Solutions," *Electronics*, vol. 10, 2021.
- [6] S. Murali e A. Jamalipour, "Mobility-Aware Energy-Efficient Parent Selection Algorithm for Low Power and Lossy Networks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 2593–2601, 2019.
- [7] A. Mohammadsalehi *et al.*, "ARMOR: A Reliable and Mobility-Aware RPL for Mobile Internet of Things Infrastructures," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 1503–1516, 2022.
- [8] H. Kim, H.-S. Kim, e S. Bahk, "MobiRPL: Adaptive, robust, and RSSI-based mobile routing in low power and lossy networks," *Journal of Communications and Networks*, vol. 24, no. 3, pp. 365–383, 2022.
- [9] T. Li *et al.*, "Wireless Recommendations for Internet of Vehicles: Recent Advances, Challenges, and Opportunities," *Intelligent and Converged Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 1–17, 2020.
- [10] P. Thubert, "Objective Function Zero for the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL)," RFC 6552, 2012.
- [11] O. Gnawali e P. Levis, "The Minimum Rank with Hysteresis Objective Function," RFC 6719, 2012.
- [12] B. Safaei *et al.*, "Impacts of Mobility Models on RPL-Based Mobile IoT Infrastructures: An Evaluative Comparison and Survey," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 167 779–167 829, 2020.
- [13] U. A. Müller, "Specially Weighted Moving Averages with Repeated Application of the EMA Operator," *Olsen Research Institute Discussion Paper, Zurich, Switzerland*, 1991.
- [14] H. Schulzrinne *et al.*, "RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications," RFC 3550, 2003.
- [15] M. Bonola *et al.*, "Opportunistic communication in smart city: Experimental insight with small-scale taxi fleets as data carriers," *Ad Hoc Networks*, vol. 43, pp. 43–55, 2016, smart Wireless Access Networks and Systems for Smart Cities.
- [16] C. Celes, A. Boukerche, e A. A. F. Loureiro, "Mobility Trace Analysis for Intelligent Vehicular Networks: Methods, Models, and Applications," vol. 54, no. 3, abr. 2021.
- [17] L. Zadeh, "Fuzzy Sets," *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, 1965.
- [18] C. C. Holt, "Forecasting Seasonals and Trends by Exponentially Weighted Moving Averages," *International Journal of Forecasting*, vol. 20, no. 1, pp. 5–10, 2004.