

A Internet das Coisas está preparada para mobilidade?

Bruno P. Santos¹, Paulo H. Rettore², Luiz F. M. Vieira³ e Antonio A.F. Loureiro³

¹Departamento de Computação e Sistemas (Decsi)
Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) - Brasil

²Communication Systems Department (KOM)
Fraunhofer FKIE, Bonn, 53177 Germany

³Departamento de Ciência da Computação (DCC)
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) - Brasil

bruno.ps@ufop.edu.br, paulo.lopes.rettore@fkie.fraunhofer.de

{lfvieira, loureiro}@dcc.ufmg.br

Abstract. *Mobility plays a key role in the design, implementation, and analysis of Internet of Mobile Things (IoMT) solutions. However, currently, this factor has not been widely investigated and understood, especially from the routing perspective, which is essential to the communication of ‘things’. In this article, we combine the concepts from the literature with our experience to be able to discuss the mobile routing requirements for IoMT and compare current solutions addressing those requirements. We evaluate the performance of Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL), the most used routing protocol in IoMT, pointing out the main limitations that RPL faces in mobility scenarios. Also, we discuss the impact of the device’s mobility patterns for routing. Finally, we highlight trends and future directions for IoMT.*

Resumo. *Na Internet das Coisas Móveis (IoMT), a mobilidade é fator essencial no projeto, implementação e análise das soluções. Contudo, esse fator não tem sido explorado e compreendido de forma ampla, especialmente do ponto de vista de roteamento, etapa fundamental para comunicação entre os objetos móveis. Neste artigo, combinamos a literatura atual com a experiência que temos para promover a discussão sobre os requisitos de roteamento para IoMT e um comparativo das soluções existentes. Ademais, avaliamos o desempenho do RPL, protocolo de roteamento mais utilizado em IoMT, apontando suas principais limitações em cenários de mobilidade. Discutimos o impacto dos padrões de mobilidade dos dispositivos na criação das rotas e por fim apontamos as tendências e direções futuras para IoMT.*

1. Introdução

Internet das Coisas (do inglês *Internet of Things (IoT)*) surge do conceito em que os objetos do dia-a-dia podem se conectar à Internet. Esse conceito é fundamentado pelo avanço e adoção dos sistemas embutidos, comunicação sem fio e, principalmente, do uso de dispositivos inteligentes¹ capazes de monitorar seu contexto, mover-se e atuar no ambiente cibernético conectado [Santos et al. 2016].

¹Aqui, são sinônimos: objetos inteligentes, dispositivos, “coisas” ou entidade que são dotadas de recursos computacionais (processamento, memória, comunicação e sensores/atuadores).

Em cenários onde os objetos podem se mover de forma autônoma ou por meio de outra entidade móvel (ex.: humanos, veículos) surge o paradigma de Internet das Coisas Móveis (*Internet of Mobile Things (IoMT)*). A simbiose entre mobilidade e IoT potencializa a capacidade e o uso desses objetos ao perceber e interagir com o ambiente e outros objetos ao seu redor, criando muitas oportunidades mas também desafios na gestão da mobilidade a nível da camada de rede, requisito importante na comunicação em IoMT [Santos et al. 2020]. Isso se dá porque (i) a camada de rede tem a função de monitorar e agir sobre alterações na topologia, tipicamente por situações de mobilidade; (ii) o processo de construção e manutenção de rotas é fundamental para uma efetiva comunicação bem como qualidade de serviço e experiência das aplicações/usuários. Assim, o desenvolvimento de soluções que se beneficiem da IoMT dependem da compreensão dos cenários de mobilidade e sua gestão para manter a consistência da rede.

O Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL)² é o principal protocolo de roteamento utilizado para dar suporte às soluções da IoT. Entretanto, o RPL apresenta limitações (ex.: de escalabilidade e responsividade) em cenários de rede onde a mobilidade é presente [Kassab and Darabkh 2020]. Desse modo, protocolos alternativos têm sido propostos como o Hydro e Mobile Matrix [Dawson-Haggerty et al. 2010, Santos et al. 2018, Bouaziz et al. 2019, Santos et al. 2020], bem como modificações no RPL [Oliveira and Vazão 2016]. Esse fator indica uma falta de padronização no uso dos protocolos para IoMT. Neste artigo, apresentamos um resumo crítico, baseado na literatura recente sobre os aspectos da mobilidade em IoT e em nossa experiência no desenvolvimento de soluções cientes da mobilidade, com o objetivo de responder a seguinte questão: *Os protocolos de roteamento atendem as demandas de mobilidade da IoT?*

A seguir, a Seção 2 apresenta aspectos impostos pela mobilidade dos dispositivos ao roteamento na IoMT. Na Seção 3 são apresentadas as propostas de soluções existentes para roteamento sob eventos de mobilidade, uma avaliação de desempenho do RPL sob eventos de mobilidade e os padrões de mobilidade aplicados à IoMT. A Seção 4 discute os desafios e o futuro da IoMT. Na Seção 5, concluímos esse estudo.

2. Mobilidade e IoT

Conectar e manter a conectividade entre os dispositivos IoT com a condição de mobilidade é uma tarefa desafiadora para os sistemas de redes e projeto de hardware e software desses dispositivos. O primeiro desafio é percebido na limitação computacional (ex.: memória, processamento e bateria) da maioria dos dispositivos utilizados nessas redes. Outro desafio está em manter a consistência da comunicação entre esses dispositivos que devem ser ciente da mobilidade e as implicações devem lidar com a concorrência, alta dinamicidade topológica, comunicação oportunística entre outros desafios [Narendra and Misra 2016].

O desempenho das aplicações em IoMT é diretamente influenciado pelos protocolos de rede cientes da mobilidade. A camada de redes desempenha papel fundamental para o funcionamento adequado da rede sob eventos de mobilidade, além de prover escalabilidade, detecção e gestão da topologia lógica da rede. Assim, protocolos de transporte e aplicação podem se beneficiar através dos serviços cientes da mobilidade providos pela camada de redes que deve realizar ao menos três operações. A primeira operação é a *detecção de mobilidade*, que objetiva descobrir quando uma entidade está se movendo

²RFC 6550

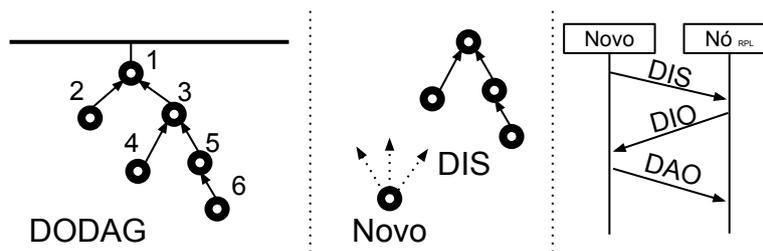


Figura 1. Instância DODAG e troca de mensagens de controle do RPL.

{inter ou entre}-redes. A segunda, *handover*, é o processo realizado por um dispositivo ao mudar seu ponto de ancoragem na rede. Este processo implica em uma alteração na configuração da topologia da rede. A terceira, *gestão da mobilidade*, é necessária para rastrear a localização da entidade móvel e manter as rotas atualizadas. Estas operações podem ser vistas como etapas fundamentais para manipular mobilidade em IoT.

2.1. RPL em poucas palavras

O RPL² é o protocolo de roteamento mais utilizado na IoT. O RPL constrói uma estrutura livre de ciclos, chamada de Destination Oriented DAG (DODAG), para representar a rede, como ilustra a Figura 1. Um dispositivo especial (estação base) é a raiz dessa estrutura e responsável pelo início de sua construção (a esquerda na figura). Um novo dispositivo se anexa a essa estrutura ao enviar mensagens de controle do tipo *DODAG Information Solicitation* (DIS) (centro da figura). A DIS é usada para solicitar informações sobre instâncias DODAG próximas existentes. Um outro nó, já presente no DODAG, responde a mensagens DIS com mensagens *DODAG Information Object* (DIO) (a direita na figura), as quais permitem que novos dispositivos conheçam os parâmetros da instância DODAG. Por fim, o novo nó envia mensagens *Destination Advertisement Object* (DAO) que passa pelos seus ancestrais no DODAG até a raiz para que rotas descendentes sejam instaladas.

Existem dois modos de operação do RPL que influenciam no roteamento (i) *storing* e (ii) *non-storing* exemplificados na Figura 1. No modo *storing*, todos os dispositivos mantêm uma rota para seu pai imediato. Essa rota é utilizada para o encaminhamento de mensagens ascendentes (em direção à raiz ou fora da sub-rede). Todos os nós mantêm uma tabela de rotas para toda sua subárvore DODAG (ex.: o nó 3 mantém rotas para 4, 5 e 6), estas rotas são usadas para encaminhamento de mensagens descendentes (de fora para dentro da sub-rede ou de um nó superior na estrutura para baixo). No modo *non-storing*, os nós da sub-rede armazenam somente uma rota para seu pai imediato enquanto a raiz é responsável por ter rotas para todo o DODAG. No modo *non-storing*, o roteamento descendente deve sempre passar pela raiz (ex.: se o nó 4 deseja enviar mensagem para o nó 6, então a mensagem deve fluir até a raiz 1 e então ser encaminhada para o nó 6), observe que neste modo de operação as rotas devem ser anexadas a cada mensagem.

3. Os protocolos de roteamento existentes atendem às demandas de IoMT?

Esta seção revisa o estado-da-arte em mobilidade aplicada à IoT do ponto de vista das demandas de roteamento. O objetivo é apresentar as demandas e os recursos que os protocolos fornecem. A discussão é direcionada à camada de rede e seus aspectos para prover suporte à mobilidade dos dispositivos e as aplicações em IoMT.

3.1. Como as “coisas” se movem?

Entender quais são os padrões de mobilidade dos objetos inteligentes é fundamental no projeto, implementação e validação de soluções em redes móveis. Existem duas alternativas para obter/criar esses padrões de mobilidade, via (i) rastros (*traces*) reais de mobilidade ou (ii) modelos sintéticos. O primeiro caso são registros de posições no espaço em função do tempo de entidade(s) reais [Kotz and Henderson 2005]. Geralmente, esses dados fornecem informações mais precisas de como as entidades se movem. Contudo, obter tais dados nem sempre é uma tarefa fácil e barata, especialmente considerando o número de entidades, o tempo de observação e a cobertura geográfica. Ademais, a privacidade dos dados pode limitar/impedir a divulgação destes rastros. Por outro lado, os modelos sintéticos de mobilidade, como o Random Waypoint (RWP) e Small World in Motion (SWIM), produzem traços completamente artificiais ou baseados no comportamento real das entidades, por meio de modelagens estatísticas de suas características de mobilidade. Apesar desses modelos produzirem dados sintéticos, a possibilidade de, com baixo custo, gerar registros variando parâmetros do modelo (como número de nós, cobertura espacial e temporal) é útil para o desenvolvimento e teste de abordagens para IoMT.

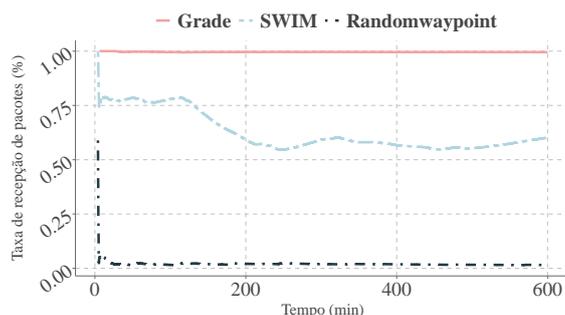


Figura 2. Desempenho do RPL em cenário estático e diferentes cenários móveis.

3.1.1. Status atual

Espera-se que os dispositivos tenham diferentes padrões de mobilidade. Alguns dispositivos podem ser quase estáticos (ex.: objetos domésticos), outros podem seguir um padrão de mobilidade similar ao humano (ex.: smartphone e veículos), e outros seguir seu próprio padrão de mobilidade (ex.: robôs autônomos). Entretanto, baseado em nosso conhecimento, até o momento não existem rastros reais de mobilidade de objetos disponíveis à comunidade. Isto se deve às questões de privacidade (informações sensíveis) ou dificuldades de rastreamento desses objetos em locais fechados como prédios ou casas (*indoor-location tracking*), por exemplo. Note que, apesar de existir uma tendência a criação de tracos reais, considerando o uso de técnicas de anonimização para preservar a privacidade dos dados, ainda é difícil prever quando tracos reais serão amplamente compartilhados e utilizados em IoT. Assim, o uso de modelos de mobilidade sintéticos se tornam uma alternativa viável para avaliar/desenvolver protocolos e aplicações. A Figura 2 mostra o desempenho do RPL para diferentes cenários (móveis e estático). Quando a mobilidade é aleatória (RWP), o RPL apresenta desempenho ruim, ao passo que demonstra desempenho moderado quando a mobilidade é similar a humana (SWIM) e bom desempenho quando não há mobilidade (Grade).

Os modelos de mobilidade sintéticos cobrem padrões de movimento humano ou não [Nunes et al. 2017, Mota et al. 2014]. Esses modelos têm sido usados para estudar, projetar e implementar soluções para IoMT, como em nossa última investigação [Santos et al. 2020], onde propomos o protocolo Mobile Matrix (μ Matrix). O mecanismo de gestão da mobilidade desse protocolo foi projetado assumindo que os dispositivos mantêm uma localização “casa” (*home location - HL*) para o qual ele, eventualmente, retorna após se mover no ambiente. O uso de uma HL é comum em diferentes padrões de mobilidade, por exemplo, humanos vão de casa para o trabalho e, eventualmente, retornam; robôs saem para fazer suas tarefas e retornam para recarregar baterias. Em [Oliveira and Vazão 2016], versões do RPL que consideram alguns nós estáticos enquanto outros se movem são analisadas. Essas abordagens modificam o RPL para obter melhor desempenho na troca de mensagens no padrão de mobilidade estudado. Nesse contexto de modelos de mobilidades, destacamos a existência de diversos rastros reais de mobilidade e modelos sintéticos disponíveis na literatura, porém, ambas as alternativas são genéricas, isto é, não são de dispositivos heterogêneos da IoT [Mota et al. 2014, Kotz and Henderson 2005]. Embora esses padrões de mobilidade não sejam criados no contexto da IoT, pesquisadores os usam como uma aproximação da mobilidade dos objetos.

Mobilidade das “coisas”

Requisitos: Rastros reais de mobilidade são necessários para entender os padrões de mobilidade na IoMT. Com esses rastros, modelos sintéticos de mobilidade podem ser projetados e diferentes cenários de redes podem ser gerados para testar a robustez das soluções em IoMT.
Status: Faltam rastros reais de mobilidade dos objetos da IoT disponíveis para a comunidade. Desse modo, modelos sintéticos adaptados tem sido usados para testar as soluções em IoMT, embora muitos desses modelos não tenham sido desenvolvidos para o contexto.

3.2. Esquemas de detecção de mobilidade

3.2.1. Requisitos

A detecção de mobilidade das entidades é uma etapa importante para que os protocolos de roteamento reajam às mudanças topológicas. A maioria dos protocolos usam eventos providos pelo esquema de detecção de mobilidade para executar o *handover* e a gestão da mobilidade. Os esquemas de detecção de mobilidade podem ser classificados em dois grupos: (i) *esquemas ativos* e (ii) *esquemas passivos*. No primeiro esquema, os dispositivos carregam um *hardware* extra, como GPS, para rastrear a mobilidade. Já nos esquemas passivos, os dispositivos inferem o movimento das entidades através da troca de mensagens (*beacons*), por exemplo. Geralmente, em IoMT são utilizados dispositivos de baixo custo, restringindo o uso de *hardware* extras embarcados nesses dispositivos. Esse fato faz com que a maioria dos protocolos de roteamento usem estratégias mais flexíveis e independentes de *hardware*, implementando esquemas passivos de detecção de mobilidade.

Embora os esquemas passivos de detecção de mobilidade sejam mais viáveis do que os ativos, em termos de custos, os esquemas passivos devem lidar com o desafio da sobrecarga de mensagens de controle, para garantir responsividade na detecção da mobilidade e balancear o consumo de energia gerado para manter tal responsividade. Por

exemplo, um esquema passivo de envio curto e periódico de mensagens de controle podem capturar mudanças topológicas mais rapidamente do que esquemas configurados para enviar mensagens de controle com maiores intervalos de tempo. Entretanto, o esquema mais responsivo para detecção da mobilidade pode inundar a rede, aumentando colisões de pacotes e degradando a qualidade do enlace.

3.2.2. Status atual

Apresentamos a seguir cinco estratégias usadas em esquemas de detecção de mobilidade que lidam com o compromisso entre sobrecarga de mensagens de controle e responsividade:

Periódico: *beacons* são disparados regularmente em intervalos fixos de tempo. Se o intervalo configurado é curto, então eventos de mobilidade serão rapidamente detectados a um alto custo com a sobrecarga de mensagens de controle. Caso o intervalo escolhido seja longo, então os dispositivos terão baixo *overhead* com mensagens de controle, porém, eles irão perceber mais lentamente as mudanças na topologia, diminuindo a responsividade.

Trickle Timer Algorithm³: este esquema apresenta inicialmente um curto intervalo de tempo entre *beacons*, dobrando este intervalo até um valor máximo pré-definido. O algoritmo reinicia o temporizador caso alguma mobilidade seja detectada. O *Trickle* foi projetado para reduzir o *overhead* na rede, assumindo que há pouca dinamicidade na rede. Contudo, se a mobilidade das entidades é frequente, o *Trickle* irá executar com o intervalo curto entre *beacons*, causando alto *overhead*. Em situação oposta, com longos intervalos entre *beacons*, o *Trickle* terá baixa responsividade a eventos de mobilidade.

Reverse Trickle Timer [Oliveira and Vazão 2016]: este esquema funciona de modo oposto ao *Trickle*. Ele inicial com um longo intervalo de tempo entre *beacons* (o máximo pré-definido). Quando um *beacon* é disparado, o algoritmo decrementa o intervalo até alcançar um valor mínimo (pré-definido). O *Reverse Trickle* assume que quando um dispositivo está ancorado à rede, ele se mantém conectado por um tempo antes de se mover.

Gara's Timer [Gara et al. 2016]: os autores propõem melhorias ao *Trickle Timer* para situações de mobilidade. Neste esquema, os dispositivos sabem as posições dos seus vizinhos. Se os vizinhos se mantêm no alcance do rádio, então não será necessário enviar *beacons* com frequência, mas se existe uma alta probabilidade de desconexão, então o algoritmo incrementa a frequência de *beacons*.

Embora existam diferentes esquemas de detecção de mobilidade, não é garantido que sejam adequados para todos os cenários de rede. Por exemplo, o *Trickle Timer* assume que os nós são parcialmente estáticos, o *Reverse Trickle Timer* assume que os nós recém conectados se mantêm neste estado por um longo tempo e o *Gara's Timer* assume ter acesso à localização de outros dispositivos na rede. Além disso, uma vez escolhido o esquema de detecção de mobilidade ele é instalado em todos os dispositivos da sub-rede IoMT, mesmo que os objetos apresentem diferentes padrões de mobilidades, por exemplo, alguns nós podem ser estáticos, outros se moverem moderadamente e outros apresentarem alta mobilidade. A Figura 3(a) ilustra um caso de estudo onde dispositivos sintéticos apresentam diferentes padrões de mobilidade como velocidade, distância de viagem e tempo

³RFC 6206

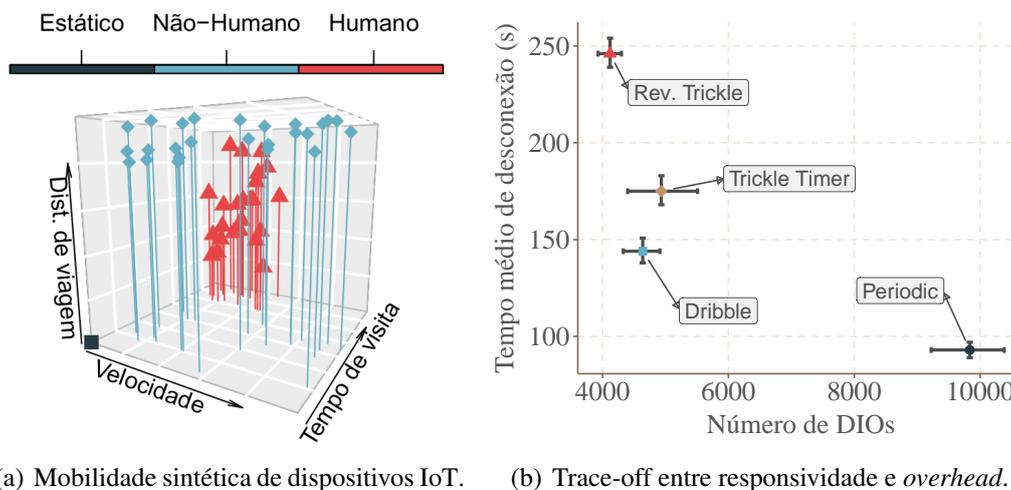


Figura 3. Mobilidade e esquemas.

de visita. A distância de viagem informa a distância média que um dispositivo percorre em seus trajetos. Já o tempo de visita indica o tempo em que este dispositivo permanece em um determinado local. Nota-se que os dispositivos com mobilidade semelhante à humana apresentam baixas velocidades, alto tempo de visita e percorrem em sua maioria média e longas distâncias. Por outro lado, o padrão não-humano atinge longas distâncias e variam entre baixas e altas velocidades, além de terem tempos curtos de visita.

Historicamente utiliza-se um único esquema passivo de detecção de mobilidade em todos os dispositivos de uma sub-rede. Entretanto, é esperado que dispositivos tenham padrões diferentes de mobilidade e, portanto, esquemas híbridos podem ser mais adequados para melhorar a responsividade frente a mobilidade. A partir dessa observação, apresentamos uma alternativa híbrida para detecção de mobilidade, Dribble [Santos et al. 2019], utilizando aprendizado de máquina. O Dribble aprende as características de mobilidade dos dispositivos e as associa a um esquema passivo mais adequado para o objeto. Isso resulta em diferentes esquemas de detecção de mobilidade nos dispositivos de uma sub-rede IoMT, com o objetivo de manter a rede consistente e reduzir a sobrecarga geral de mensagens de controle para apenas os dispositivos com alta mobilidade. A Figura 3(b) apresenta o compromisso entre tempo médio de desconexão e *overhead* para os esquemas de detecção de mobilidade (mensagens de controle DIOs), sendo a região inferior mais à esquerda indica melhor balanço do compromisso.

Detecção de mobilidade

Requisitos: A maioria dos protocolos de roteamento usam esquemas passivos de detecção de mobilidade para realizar o handover e gestão da mobilidade. Contudo, eles precisam lidar com o trade-off entre sobrecarga de controle *overhead* e responsividade na detecção da mobilidade.

Status: Geralmente, um único esquema de detecção é utilizado por todos os dispositivos da sub-rede, entretanto abordagens híbridas podem balancear melhor esse compromisso.

3.3. Padrões de fluxos de dados para aplicações móveis em IoT

As rotas construídas pelos protocolos de roteamento impactam diretamente nos padrões de fluxos de dados. Os dados tipicamente fluem seguindo três padrões: Multiponto para

Ponto (M2P), Ponto para Multiponto (P2M) e Ponto para Ponto (P2P). Cada padrão apresenta diferentes características de roteamento que influenciam o consumo de recursos (ex.: memória e energia) dos dispositivos e limitam as possibilidades de comunicação.

M2P: conhecido como coleta de dados. Este padrão suporta as aplicações que precisam reunir, em um único ponto, os dados dos dispositivos da sub-rede IoT. O principal desafio para os protocolos de roteamento que usam este padrão é criar e manter (proativamente ou sob-demanda) as rotas dos dispositivos em direção a um único destinatário (Ex.: estação base). Tipicamente uma estrutura de árvore é criada para realizar o roteamento e cada nó na sub-rede mantém a informação para seu pai imediato na estrutura.

P2M: conhecido como disseminação de dados. Esse padrão suporta as aplicações que disseminam dados a partir de uma fonte para, parte ou, todos os outros dispositivos da sub-rede IoT. O principal desafio dos protocolos que suportam P2M é promover uma maneira eficiente de propagar a informação para todos os dispositivos evitando recepções duplicadas e transmissões desnecessárias devido a comunicação ser geralmente em *broadcast*.

P2P: este padrão permite a comunicação entre quaisquer pares de dispositivos na sub-rede, generalizando os padrões acima citados. O P2P flexibiliza a comunicação para aplicações IoMT, porém, o P2P impõe maior uso de recursos dos dispositivos (ex.: memória, energia) visto que protocolos que suportam P2P geralmente requerem que os dispositivos armazenem tabelas de roteamento mais extensas.

3.3.1. Status atual

Para o padrão M2P, existem dois protocolos de roteamento amplamente conhecidos e utilizados: o Collection Tree Protocol (CTP)⁴ e o RPL. Contudo, o CTP não oferece suporte aos padrões P2M e P2P, suportados pelo RPL. Ambos protocolos utilizam o *Trickle Timer* como esquema passivo de detecção de mobilidade. Ao notar a mobilidade, o processo de *handover* e gestão de mobilidade atuam diretamente na mudança do “pai” preferido na árvore de roteamento mantendo a conectividade da rede. Para a comunicação P2M os protocolos *Deluge* [Chlipala et al. 2004] e *Trickle Algorithm* [Levis et al. 2011] oferecem melhor suporte que o RPL. *Deluge* foi projetado para disseminar grandes quantidades de dados enquanto o *Trickle Algorithm* para pequenos volumes de dados. Embora estes protocolos tenham sido usados em cenários móveis, ainda requerem mais testes e validações.

O RPL suporta fluxo de dados P2P e é considerado o protocolo de roteamento padrão em IoT. Contudo, o protocolo apresenta instabilidade quando a mobilidade dos dispositivos é frequente (vide Figura 2). Isso motiva o desenvolvimento de soluções que forneçam melhor suporte à mobilidade [Oliveira and Vazão 2016]. Além de modificações no RPL, outras abordagens têm sido propostas como os protocolos μ Matrix, eXtend Collection Tree Protocol (XCTP) e Hydro [Santos et al. 2015, Santos et al. 2018]. Para exemplificar, μ Matrix usa um esquema de endereçamento hierárquico e uma máquina de estados finitos para gerir a mobilidade dos elementos da sub-rede enquanto provê roteamento P2P. Embora existam abordagens que melhoram o RPL em cenários móveis, elas ainda requerem mais estudos para serem amplamente utilizadas pela comunidade.

⁴<http://www.tinyos.net/tinyos-2.1.0/doc/html/tep119.html>

Padrões de fluxos de dados

Requisitos: Protocolos de roteamento para IoMT devem suportar ao menos um dos padrões: M2P, o tráfego dos dispositivos para uma estação base; P2M, o tráfego de um dispositivo para os outros; P2P, o tráfego de qualquer dispositivo para qualquer outro na sub-rede.

Status: O RPL suporta todos os padrões de fluxos de dados, mas a comunicação se torna instável em cenários com mobilidade. Embora existam extensões do RPL e novas abordagens, elas ainda não foram padronizadas e amplamente validadas.

3.4. Escalabilidade

3.4.1. Requisitos

Prover escalabilidade em uma rede IoMT requer estratégias eficientes para gestão da mobilidade. Todos os níveis da arquitetura IoT devem considerar o uso de recursos (ex.: memória para tabelas de rotas, processamento para encontrar rotas existentes, entre outros) que pode impactar na escalabilidade da rede. Este tópico demanda atenção, pois sub-redes IoT podem ser compostas por centenas de dispositivos conectados ou milhares/milhões de dispositivos como em uma cidade inteligente (*smart city*)⁵.

3.4.2. Status Atual

A escalabilidade dos protocolos de roteamento para mobilidade tem relação com o padrão de fluxo de dados ao qual ele provê. Considerando o M2P, os protocolos, no geral, apresentam boa escalabilidade. Entretanto, para os padrões P2M e P2P a escalabilidade é um problema. O RPL, por exemplo, tem dois modos de operação (*store* e *non-store*²) que usam diferentes estratégias de armazenamento das rotas. No modo *store*, o fator limitante é a necessidade de armazenar entradas de rotas de todos os nós em uma sub-árvore do DODAG (Seção 2.1). No modo *non-store*, o fator limitante é o tamanho do cabeçalho do pacote, nos quais as rotas reversas (partindo da raiz para os dispositivos) são armazenadas.

Em [Santos et al. 2018, Santos et al. 2020] investigamos a escalabilidade de uma rede IoMT com diferentes protocolos de roteamento (RPL, Mobility Management RPL (MMRPL), Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) e μ Matrix) e diferentes cenários móveis usando modelos de mobilidade. Os cenários de rede foram projetados

⁵RFC 5548

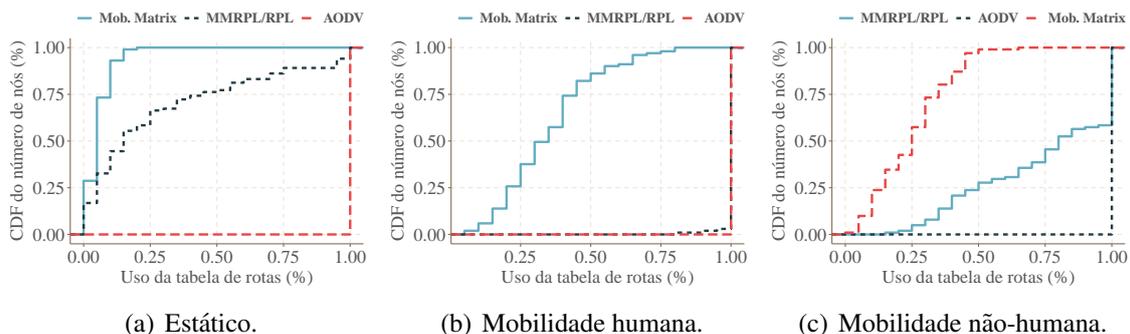


Figura 4. Escalabilidade dos protocolos em diferentes cenários de rede.

considerando: (i) mobilidade similar a humana; (ii) mobilidade não-humana e; (iii) nós estáticos. Foram utilizados 100 dispositivos com 20 entradas na tabela de rotas e alcance do rádio de $150m$ cada, utilizando o simulador Cooja. No cenário estático, os dispositivos estão organizados em grade $1000m \times 1000m$. Nos cenários móveis, a posição dos dispositivos foram geradas através de modelos sintéticos de mobilidade Group Regularity Mobility (GRM) e *Cyclical Random Waypoint (CRWP)* [Nunes et al. 2017, Santos et al. 2018]. A Figura 4 apresenta o uso de memória dos protocolos em diferentes cenários. É possível notar que o μ Matrix apresenta menor uso das entradas da tabela de rotas quando comparado com os demais protocolos. Essa é uma melhoria relevante, pois ao preencher todas as entradas disponíveis, o dispositivo pode não ter rotas para alguns destinatários, degradando a confiabilidade e escalabilidade da rede. Isso evidencia a necessidade de melhorias na implementação do RPL.

Escalabilidade

Requisitos: Protocolos de roteamento para IoMT devem suportar dezenas ou milhares de dispositivos conectados na rede.

Status: Protocolos de roteamento apresentam boa escalabilidade com o padrão de tráfego M2P, porém isso não acontece com o P2P e P2M. Melhores estratégias de escalabilidade são observadas nos protocolos não padrões.

3.5. Confiabilidade e robustez

3.5.1. Requisitos

A mobilidade das entidades, a qualidade dos enlaces com rádios de baixa potência, a falta de energia ou mesmo falhas no *hardware* dos dispositivos são alguns dos desafios que precisam ser superados para que IoMT seja robusta e confiável em termos de conectividade. Em [Gnawali et al. 2009], os autores apontam metas de confiabilidade, robustez, eficiência e independência de hardware que os protocolos de roteamento para Low Power and Lossy Network (LLN) devem atender. É indicado que ao menos $\geq 90\%$ dos pacotes fim-a-fim sejam entregues mesmo sob condições adversas da rede para que o protocolo seja considerado confiável, isto sem o uso de mecanismos fim-a-fim de confirmação. Além disso, os protocolos devem ser robustos para operar em variadas condições de redes, cenários de desconexões e carga de trabalho sem a necessidade de ajustes finos de configurações. Embora essas metas tenham sido declaradas para cenários estáticos, estas declarações deveriam ser consideradas também para os cenários móveis.

3.5.2. Status Atual

Prover confiabilidade em situações de mobilidade não é uma tarefa fácil para os protocolos de roteamento. Isso porque os protocolos devem lidar com o *trade-off* entre responsividade e custos com a sobrecarga de mensagens de controle, além das questões de escalabilidade na construção das rotas, as quais podem impactar na confiabilidade da entrega de pacotes. Ao considerar robustez e tolerância a falhas, algumas técnicas como *broadcasts* locais e construção de rotas sob-demanda podem ser aplicados [Peres et al. 2018], embora essas técnicas reduzam os problemas relacionados à robustez da rede, ainda existe muitos desafios em aberto [Iova et al. 2016, Oliveira and Vazão 2016, Kassab and Darabkh 2020].

Em [Iova et al. 2016, Santos et al. 2018], os autores avaliaram, por meio de simulações e experimentos reais em *testbeds*, diferentes protocolos de roteamento, desconsiderando mecanismos fim-a-fim de confirmação, em cenário de redes estáticos e móveis. Foi observado que no contexto estático a taxa de entrega de dados, no padrão de fluxo M2P, atingiu mais de 97% para os protocolos RPL, μ Matrix, AODV e XCTP. Considerando o padrão P2M, a taxa de entrega de dados média foi maior que 95%⁶. Para a comunicação P2P, o RPL apresentou a taxa de entrega de dados de 74%, se mantendo abaixo das demandas de confiabilidade. Por outro lado, abordagens não padrão tem apresentado melhores desempenhos, como o Hydro Protocol e o μ Matrix que alcançaram taxas de entrega de dados acima de 95%.

No contexto móvel, a situação é diferente. Os autores conduziram experimentos em diversas versões do RPL modificado para cenários móveis. No padrão de fluxo M2P, os protocolos apresentaram taxa de entrega de dados de respectivamente mais de 90% e 47% quando 1% e 50% dos 100 dispositivos se moviam na rede. Além disso, é indicado que os protocolos RPL, MMRPL, e AODV não alcançam os requisitos de confiabilidade enquanto o μ Matrix apresenta melhores índices. É importante destacar que o μ Matrix explora um possível padrão de mobilidade, isto é, sua implementação leva em conta o conceito de *home location* (vide Sec. 3.1) enquanto os outros protocolos não o fazem.

Confiabilidade e robustez

Requisitos: *Um protocolo de roteamento para IoMT deve fornecer alto nível de confiabilidade ($\geq 90\%$ de entrega de dados quando existe rota), mesmo em cenários de redes em constante mudança e sem mecanismos de confirmação fim-a-fim.*

Status: *Protocolos de roteamento habilitados para mobilidade apresentam confiabilidade satisfatória em cenários estáticos, contudo, em cenários móveis a confiabilidade se torna um desafio em aberto. Protocolos não padrões exploram características da mobilidade para melhorar a confiabilidade, indicando o caminho para futuros projetos e implementações.*

3.6. Suporte ao IPv6 e mobilidade

3.6.1. Requisitos

O suporte ao endereçamento de milhões de dispositivos (tipicamente com limitações computacionais) é um requisito importante a ser considerado em IoT. Desse modo, é desejável que os protocolos ofereçam suporte à mobilidade em conjunção com esquemas de endereçamento. O suporte à mobilidade pode considerar (i) *mobilidade intra sub-rede*, a qual permite que dispositivos se movam dentro da mesma sub-rede; e (ii) *mobilidade extra sub-rede*, onde dispositivos podem se mover de uma rede para outra. O esquema de endereçamento e o mecanismo de suporte à mobilidade devem “conversar” entre si para prover comunicação transparente sob eventos de mobilidade.

3.6.2. Status atual

Os protocolos para IoMT são classificados em Interior Mobile Routing Protocols (IMRP) e Exterior Mobile Routing Protocols (EMRP). A maioria dos protocolos de roteamento

⁶Dispositivos sem restrições de memória para armazenamento das rotas no RPL e AODV.

apresentados neste estudo, RPL e suas variações, μ Matrix, XCTP, e Hydro, são exemplos de IMRP. Para que os protocolos, classificados como EMRP, ofereçam suporte à mobilidade entre sub-redes são necessárias algumas adaptações na implementação do Internet Protocol version 6 (IPv6), como o Mobile IPv6 (MIPv6) [Praptodiyono et al. 2020], por exemplo. Estas abordagens tentam adicionar a capacidade de *roaming* aos dispositivos, mantendo suas conexões existentes. Baseado em nossos estudos, atualmente não existe um padrão EMRP para IoT. Além disso, o MIPv6 e suas versões adaptadas para IoT normalmente são impactados negativamente com a escalabilidade da rede. Por exemplo, quando um grupo de dispositivos da mesma sub-rede se espalham por outras redes, muitos estados devem ser armazenados (geralmente nos roteadores de borda [Jara and Ladid 2013]) para manter seus rastros de mobilidade, o que geralmente não é eficiente e escalável.

IPv6 e mobilidade

***Requisitos:** Protocolos de roteamento para IoMT devem fornecer suporte ao uso do IPv6 sob eventos de mobilidade intra ou extra sub-rede.*

***Status:** A maioria dos protocolos de roteamento atuais lidam com a mobilidade intra sub-rede, enquanto poucos se preocupam com a mobilidade extra sub-rede. Embora alguns protocolos IPv6 tenham sido propostos para lidar com a mobilidade, o roteamento eficiente intra e extra sub-rede ainda é uma questão de pesquisa em aberto.*

4. O futuro da IoMT

Nessa seção destacamos os principais desafios e tendências da IoMT. O primeiro desafio é o compromisso entre responsividade e *overhead* como fator crucial para o crescimento da IoMT. Ou seja, os protocolos devem lidar com a manutenção dos estados da rede sob eventos de mobilidade, combinando com o consumo consciente de energia e do uso dos recursos de redes. Atualmente, a maioria dos protocolos de roteamento, habilitados para mobilidade, tentam lidar com este compromisso, contudo, nota-se que as soluções não se adaptam aos diferentes cenários de mobilidade e, portanto, perdem eficiência em seus propósitos. Além disso, observamos que P2P tende a ser o padrão de disseminação de tráfego dominante para o futuro da IoMT, como vistos em muitas aplicações [Atzori et al. 2014, Iova et al. 2016, Kassab and Darabkh 2020]. No entanto, prover rotas P2P em cenários de redes altamente dinâmicas e heterogêneas não é uma tarefa trivial, uma vez que a mobilidade das entidades causam mudanças topológicas e, essas mudanças, devem ser transparentes para as aplicações.

Outro desafio enfrentado, pela camada de rede, no projeto de soluções cientes da mobilidade em IoT são os diferentes padrões de mobilidade dos objetos. Embora modelos sintéticos têm sido usados para investigar e desenvolver soluções para IoMT, atualmente não existem traços reais de mobilidade dos dispositivos disponíveis [Atzori et al. 2014]. A falta de dados e entendimento dos padrões de mobilidade são limitantes para o avanço da área. Sendo assim, o desenvolvimento de investigações que lidam com essas questões, modelando e entendendo a variabilidade da mobilidade dos dispositivos representa papel fundamental para que soluções eficientes e robustas sejam propostas.

Além dos fatores destacados anteriormente, é esperado que IoMT se beneficiem dos padrões de comunicação 5G (5ª geração de sistemas sem fio) e 6G, por atenderem os requisitos de mobilidade dessas redes. Esses padrões lidam com as limitações das

gerações anteriores, tais como, consumo de energia, comunicação *machine-to-machine* e velocidade de transmissão (10× mais rápida que 4G). Além disso, 5G e 6G têm sido projetados para dar suporte à comunicação móvel e de baixa potência. Os padrões podem escalar até bilhões de dispositivos. A comunicação 5G ou 6G utilizará ondas milimétricas, permitindo alta velocidade de transmissão e curto raio de alcance, sendo necessárias pequenas células para prover conectividade, além disso, permite o uso do Multiple Input Multiple Output (MIMO), bem como o beamforming (para redução de interferência e melhorias da eficiência da comunicação). Esses e outros tópicos são relevantes para o futuro da IoMT e este artigo não é suficiente para cobrir-los, sendo necessário, portanto, que o leitor considere outras fontes que melhor exploram cada um desses tópicos [Khurpade et al. 2018, Lu and Zheng 2020].

5. Conclusão

Neste artigo, discutimos os requisitos de roteamento considerando a mobilidade em IoT. Por meio de estudos da literatura e nossa experiência no desenvolvimento de soluções para IoMT, apresentamos um resumo crítico sobre os fatores fundamentais que impactam na robustez, escalabilidade e confiabilidade das redes IoMT, tal como no projeto, implementação e análise das soluções desenvolvidas para IoT. Os estudos destacam que os cenários de mobilidade devem ser melhor explorados e compreendidos, pois os protocolos de roteamento atuais apresentam limitações ao lidarem com cenários de rede em constante mudança, impondo barreiras para o desenvolvimento de soluções para IoMT. Ademais, com base nas premissas de requisitos e soluções de roteamento para IoMT, a proposta de novos protocolos capazes de lidar com essas questões se demonstra uma oportunidade em aberto.

Este trabalho contou com o apoio da CAPES, CNPq, Fapemig e Fapesp projetos #15/24494-8 & 18/23064-8.

Referências

- Atzori, L., Carboni, D., and Iera, A. (2014). Smart things in the social loop: Paradigms, technologies, and potentials. *Ad Hoc Networks*, 18:121–132.
- Bouaziz, M., Rachedi, A., Belghith, A., Berbineau, M., and Al-Ahmadi, S. (2019). EMA-RPL: Energy and mobility aware routing for the Internet of Mobile Things. *Future Generation Computer Systems*, 97:247–258.
- Chlipala, A., Hui, J., and Tolle, G. (2004). Deluge: data dissemination for network reprogramming at scale. *University of California*.
- Dawson-Haggerty, S., Tavakoli, A., and Culler, D. (2010). Hydro: A hybrid routing protocol for low-power and lossy networks. In *IEEE SGC*.
- Gara, F., Ben Saad, L., Ben Hamida, E., Tourancheau, B., and Ben Ayed, R. (2016). An adaptive timer for RPL to handle mobility in wireless sensor networks. *International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*.
- Gnawali, O., Fonseca, R., Jamieson, K., Moss, D., and Levis, P. (2009). Collection tree protocol. In *7th ACM ENSS*.
- Iova, O., Picco, P., Istomin, T., and Kiraly, C. (2016). RPL: The Routing Standard for the Internet of Things... Or Is It? *IEEE Communications Magazine*.

- Jara, A. J. and Ladid, L. (2013). The Internet of Everything through IPv6: An Analysis of Challenges, Solutions and Opportunities.
- Kassab, W. and Darabkh, K. A. (2020). A–Z survey of Internet of Things: Architectures, protocols, applications, recent advances, future directions and recommendations. *Journal of Network and Computer Applications*, 163:102663.
- Khurpade, J. M., Rao, D., and Sanghavi, P. D. (2018). A Survey on IOT and 5G Network. In *2018 ICSCET*, pages 1–3.
- Kotz, D. and Henderson, T. (2005). Crawdad: A community resource for archiving wireless data at dartmouth. *IEEE Pervasive Computing*.
- Levis, P., Clausen, T., Hui, J., Gnawali, O., and Ko, J. (2011). The trickle algorithm. *Internet Engineering Task Force, RFC6206*.
- Lu, Y. and Zheng, X. (2020). 6G: A survey on technologies, scenarios, challenges, and the related issues. *Journal of Industrial Information Integration*.
- Mota, V. F., Cunha, F. D., Macedo, D. F., Nogueira, J. M., and Loureiro, A. A. (2014). Protocols, mobility models and tools in opportunistic networks: A survey. *Computer Communications*, 48:5–19.
- Narendra, N. and Misra, P. (2016). Research Challenges in the Internet of Mobile Things.
- Nunes, I. O., Celes, C., Silva, M. D., Vaz de Melo, P. O., and Loureiro, A. A. (2017). GRM: Group Regularity Mobility Model. In *MSWiM '17*.
- Oliveira, A. and Vazão, T. (2016). Low-power and lossy networks under mobility: A survey. *Computer Networks*, 107:339–352.
- Peres, B., Santos, B. P., de O. Souza, O. A., Goussevskaia, O., Vieira, M. A. M., Vieira, L. F. M., and Loureiro, A. A. F. (2018). Matrix: Multihop Address allocation and dynamic any-To-any Routing for 6LoWPAN. *Computer Networks*.
- Praptodiyono, S., Firmansyah, T., Alaydrus, M., Santoso, M. I., Osman, A., and Abdullah, R. (2020). Mobile IPv6 Vertical Handover Specifications, Threats, and Mitigation Methods: A Survey. *Security and Communication Networks*.
- Santos, B. P., Goussevskaia, O., Vieira, L. F., Vieira, M. A., and Loureiro, A. A. (2018). Mobile Matrix: Routing under Mobility in IoT, IoMT, and Social IoT. *Ad Hoc Networks*.
- Santos, B. P., Rettore, P. H., Vieira, L. F., and Loureiro, A. A. (2019). Dribble: A learn-based timer scheme selector for mobility management in IoT. In *2019 WCNC*. IEEE.
- Santos, B. P., Silva, L. A., Celes, C., Borges, J. B., Neto, B. S. P., Vieira, M. A. M., Vieira, L. F. M., Goussevskaia, O. N., and Loureiro, A. (2016). Internet das coisas: da teoria à prática. *Minicursos SBRC*.
- Santos, B. P., Vieira, L. F. M., and Loureiro, A. A. F. (2020). Routing and Mobility Management in the Internet of Things. In *XXXVIII SBRC*.
- Santos, B. P., Vieira, M. A., and Vieira, L. F. (2015). eXtend collection tree protocol. In *WCNC*, pages 1512–1517. IEEE.