



UFOP

Universidade Federal
de Ouro Preto

**Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Computação e Sistemas**

**MobETX: uma métrica de
roteamento ciente da mobilidade para
Internet das Coisas**

Gabriel Augusto Requena dos Reis

**TRABALHO DE
CONCLUSÃO DE CURSO**

ORIENTAÇÃO:
Bruno Pereira dos Santos

**Abril, 2020
João Monlevade–MG**

Gabriel Augusto Requena dos Reis

MobETX: uma métrica de roteamento ciente da mobilidade para Internet das Coisas

Orientador: Bruno Pereira dos Santos

Monografia apresentada ao curso de Sistemas de Informação do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para aprovação na Disciplina “Trabalho de Conclusão de Curso II”.

Universidade Federal de Ouro Preto

João Monlevade

Abril de 2020

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R375m Reis, Gabriel Augusto Requena dos .
MobETX [manuscrito]: uma métrica de roteamento ciente da
mobilidade para Internet das Coisas. / Gabriel Augusto Requena dos Reis.
- 2020.
45 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Bruno Pereira dos Santos.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Sistemas de
Informação .

1. Internet. 2. Computadores - Comunicações digitais. 3. Redes de
computação - Protocolos. I. Santos, Bruno Pereira dos. II. Universidade
Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 004.7

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gabriel Augusto Requena Dos Reis

MobETX: uma métrica de roteamento ciente da mobilidade para Internet das Coisas

Monografia apresentada ao Curso de Sistemas de Informação do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Sistemas de Informação

Aprovada em 27 de Abril de 2021

Membros da banca

Prof. Dr. Bruno Pereira dos Santos - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. Marlon Paolo Lima - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Me. Bruno Cerqueira Hott - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Bruno Pereira dos Santos, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 29/04/2019



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Pereira dos Santos, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/04/2021, às 16:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0165348** e o código CRC **0C585061**.

Dedico este trabalho aos meus pais, a quem agradeço as bases que deram para me tornar a pessoa que sou hoje e que com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida, a todos meus amigos e colegas, grandes companheiros de jornada e a todo corpo docente e discente da Universidade Federal de Ouro Preto, a quem fico lisonjeado por dele ter feito parte.

Agradecimentos

Agradeço à todos os docentes do curso de Sistemas de informação da Universidade Federal de Ouro Preto, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação ao longo do curso, em especial ao Bruno Pereira dos Santos pela sua orientação e seu grande desprendimento em ajudar-me e aos professores que participaram da banca de avaliação deste trabalho.

“Science is more than a body of knowledge; it is a way of thinking.”

— Carl Sagan (1934 – 1996),
in: The Demon-Haunted World: Science as a Candle in the Dark.

Resumo

O processo de roteamento em *Internet of Things* (IoT) é um aspecto chave quando dispositivos podem mover. O roteamento habilita a comunicação entre os dispositivos, potencializando a funcionalidade dos objetos do dia-a-dia a eles anexados. Contudo, a mobilidade causa frequentes mudanças na topologia tornando o processo de roteamento um desafio. A maioria dos protocolos de roteamento da IoT usam um estimador de enlace (*Link Quality Estimator* (LQE)) no processo de escolha de rotas, sendo o *Expected Transmission Count* (ETX) um dos mais utilizados para ponderar enlaces sem fio entre dispositivos estáticos. Contudo, o ETX não funciona bem quando os dispositivos se movem. Nesta monografia, apresentamos o *Mobile Expected Transmission Count* (MobETX) como estimador para enlaces sem fio entre dispositivos móveis. MobETX mantém as características do ETX, mas usa métricas de mobilidade dos dispositivos para dar assistência no processo de escolha de rotas. Em nossos experimentos, o protocolo de roteamento usando MobETX apresentou melhora de ao menos 5% na taxa de entrega de pacotes quando comparado com ETX em cenários de alta mobilidade e $> 98\%$ de entrega de pacotes em cenários estáticos.

Palavras-chaves: LQE, ETX, MobETX, Estimador de qualidade de enlace, Expected Transmission Count, Mobile Expected Transmission Count

Abstract

The routing process in the *Internet of Things* (IoT) is a key aspect when devices can move. It enables devices to communicate with each other enhancing functionalities of everyday objects where they are attached. However, the mobility causes frequent topology changes turning the routing process a challenge. Most IoT's routing protocols rely on a *Link Quality Estimator* (LQE) to weigh links and choose routes. The *Expected Transmission Count* (ETX) commonly is a good LQE for wireless links between static devices, but when devices move ETX fails. In this work, we present *Mobile Expected Transmission Count* (MobETX) as a new metric to qualify multi-hop wireless links for mobile scenarios. MobETX keeps all features from ETX but uses the devices' mobility metrics to assist the routing process of choosing routes. In our experiments, the routing protocol by using MobETX is at least 5% better in package delivery than ETX in high-mobility scenarios and delivers > 98% of packets on static ones.

Key-words: LQE, ETX, MobETX, Expected Transmission Count, Mobile Expected Transmission Count

Lista de ilustrações

Figura 1 – RPL - Entrada de um novo nó e mensagens de controle	18
Figura 2 – Linha do tempo dos LQEs.	20
Figura 3 – Classificação dos LQEs.	21
Figura 4 – Experimentos de configuração.	37
Figura 5 – Experimentos no melhor cenário.	39
Figura 6 – Pacotes perdidos com intervalo de confiança nos experimentos com a melhor configuração.	39

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros do Contiki/Cooja.	34
Tabela 2 – Especificações do <i>hardware</i> utilizado nos experimentos.	34
Tabela 3 – Especificações da máquina virtual utilizada nos experimentos.	34
Tabela 4 – Experimentos a serem realizados.	35
Tabela 5 – Matriz de efeito dos fatores em cenários móveis.	38
Tabela 6 – Matriz de efeito dos fatores em cenários estáticos.	38
Tabela 7 – Tabela ANOVA em cenário móvel.	38
Tabela 8 – Tabela ANOVA em cenário estático.	38

Lista de abreviaturas e siglas

- ACK** *acknowledgement*. 22, 24, 25
- ALQI** *Average Link Quality Indicator*. 28
- ARQ** *Automatic Repeat Request*. 23
- ASL** *Link Asymmetry Level*. 26
- ASNR** *Channel Average Signal to Noise Ratio*. 26, 28
- BLE** *Bursty Link Estimator*. 25
- CCOR** *Optimizing Routing Based on Congestion Control*. 27
- CoDU** *Contact duration*. 30
- CSI** *Channel State Information*. 26
- CTP** *Collection Tree Protocol*. 28
- DAO** *Destination Advertisement Object*. 18
- DAO-Ack** *DAO-Ack*. 19
- dBm** *decibel miliwatt*. 21
- DIO** *DODAG Information Object*. 18, 19
- DIS** *DODAG Information Solicitation*. 18
- DODAG** *Destination-Oriented Directed Acyclic Graphs*. 18, 19
- EDGE** *Encounter regularity*. 31
- EEM** *Energy Estimation Metric*. 27
- ELQET** *Enhanced Link Quality Estimation Technique*. 28
- EM** *Estimativa de Mobilidade*. 32, 33, 35, 37, 38
- ETT** *Expected Transmission Time*. 24
- ETX** *Expected Transmission Count*. 7, 8, 16, 17, 19, 24–27, 32–40
- EWMA** *Exponentially Weighted Moving Average*. 23, 25, 27

F-LQE *Fuzzy Link Quality Estimator*. 26

FDR *Frame Delivery Ratio*. 22

FLI *Fuzzy Logic Based Link Quality Indicator*. 23

GPS *Global Position System*. 27, 32

IETT *Improved Expected Transmission Time*. 24

INCO *Inter-contact time*. 30

IoT *Internet of Things*. 7, 8, 16, 18

IPv6 *Internet Protocol version 6*. 16

KLE *The Kalman Filter Based Link Quality Estimator*. 23

LI *Link Inefficiency*. 24

LLN *Low-power and Lossy Networks*. 18, 19, 21, 24, 25, 28

LQE *Link Quality Estimator*. 7–9, 15–18, 20–28, 32, 36, 38, 40

LQI *Link Quality Indicator*. 21, 26–28

MaxCON *Maximum contacts per hour*. 30

METER *Distributed Frame Counter*. 28

MobETX *Mobile Expected Transmission Count*. 7, 8, 15, 17, 18, 20, 27, 28, 32–36, 38–40

MobETX-OF *Mobile Expected Transmission Count — Objective Function*. 33

MRHOF *Minimum Rank Objective Function with Hysteresis*. 20, 33

NCRM *Neo-hybrid Composite Routing Metric*. 26

OF *Função Objetivo*. 18–20

OF-EC *Objective Function Based Combined Metric using Fuzzy Logic Method*. 25

OF0 *Função Objetivo Zero*. 19

PDR *Packet Delivery ratio Rate*. 22

PRR *Packet Reception Rate*. 22–24, 26–28

RADG *Radius of gyration.* 31

RNP *Required Number of Packet retransmissions.* 22–25

RoLL *Routing over Low-power and Lossy networks.* 18

RPL *Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks.* 15–20, 27, 32, 34, 40

RSS *Received Signal Strength.* 23

RSSI *Received Signal Strength Indication.* 21, 26, 28

RVFL-LQP *Random-vector-functional-link-based LQP.* 22

SF *Link Stability Factor.* 26

SNR *Signal to Noise Ratio.* 21–23, 26–28

SPRR *Smoothed Packet Reception Ratio.* 26

TADR *Traffic-aware Dynamic Routing.* 25

TALENT *Temporal Adaptive Link Estimator with No offline Training.* 28

TOPO *Topological overlap.* 31

TRVD *Travel distance.* 31

TRVT *Travel time.* 31

VISIT *Visit time.* 31

WMEWMA *The Window Mean with Exponentially Weighted Moving Average.* 23, 25

WNN-LQE *Wavelet-Neural-Network-based Link Quality Estimation.* 22

WRE *The Weighted Regression Estimator.* 26

Lista de símbolos

α	Letra grega Alfa
β	Letra grega Beta
γ	Letra grega Gama
δ	Letra grega Delta
λ	Letra grega Lambda
σ	Letra grega Sigma
τ	Letra grega Tau
υ	Letra grega Upsilon
Ω	Letra grega maiúscula Ômega
\in	Pertence

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	<i>O Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL)</i> . . .	18
2.2	Classificação dos LQEs	20
2.3	Métricas de mobilidade	28
3	ABORDAGEM PROPOSTA	32
3.1	<i>Background</i>	32
3.2	Um estimador híbrido: MobETX	32
4	METODOLOGIA	34
5	RESULTADOS	37
6	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS	41

1 Introdução

Internet of Things (IoT) é um conceito que vem ganhando força no cenário moderno, sua ideia básica é potencializar as funcionalidades dos objetos do dia a dia através da comunicação (tipicamente sem fio), do uso de sensores de contexto e atuadores para mobilidade (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010; KASSAB; DARABKH, 2020; SANTOS et al., 2016). Ao passo que a tecnologia avança, a IoT se torna ubíqua, assim, cada vez mais temos a possibilidade de monitorar o nosso contexto, com o diferencial de estarmos conectados em redes trocando informações, o que facilita as tomadas de decisões ou obtenção de respostas a um determinado evento.

Para viabilizar esses benefícios, destacamos a construção e manutenção eficiente das rotas entre os dispositivos, como uma das principais subtarefas de suporte a IoT. O *Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks* (RPL)¹ é um protocolo de roteamento com suporte ao *Internet Protocol version 6* (IPv6) frequentemente utilizado na IoT. O RPL é baseado em vetor de distâncias que utiliza um estimador de qualidade de enlace, referenciados aqui pelo termo em inglês *Link Quality Estimator* (LQE), que visa classificar os enlaces sem fio em uma determinada janela de tempo. Em (BACCOUR et al., 2012) são apresentadas duas categorias de LQEs: Os LQEs baseados em *hardware* ou *software*. Os LQEs baseados em *hardware*, leem as informações diretamente do transceptor de rádio (por exemplo, o rádio CC2420 (INSTRUMENTS, 2007) e similares), por outro lado, os LQEs baseados em *software* aplicam algum método numérico ou estatístico sobre a transmissão de pacotes (envio, recepção e confirmação). Naturalmente, os LQEs baseados em *software* são amplamente empregadas devido ao seu fácil projeto, implantação e custo associado.

Atualmente, o *Expected Transmission Count* (ETX) (COUTO et al., 2005) tem notoriedade como LQE baseado em *software* devido às suas características. O ETX evita enlaces de maior perda, penaliza rotas com mais saltos e considera enlaces assimétricos. O ETX tem sido empregado em diferentes implementações de protocolos de roteamento ao longo do tempo (SANTOS; VIEIRA; VIEIRA, 2017; SANTOS et al., 2018; KASSAB; DARABKH, 2020), além disso, o ETX foi estendido de diferentes modos para acomodar situações onde o ETX original não se encaixava bem, como em situações com diferentes taxas de transmissão de dados, dispositivos com mais de um transceptor de rádio (BAHR; WANG; JIA, 2006), ou ainda em cenários onde a mobilidade está presente (DRAVES; PADHYE; ZILL, 2004).

Nesta monografia, damos destaque ao cenário móvel. A mobilidade está presente no dia a dia e isso torna a vida mais fácil e os aplicativos da IoT mais flexíveis. Quando

¹RFC 6550

um dispositivo se move, há várias métricas de mobilidade que podem ser extraídas, por exemplo, velocidade do nó, tempos de espera, distância de viagem, contatos potenciais, pontos de interesse, entropia de movimento e outros. Em redes, especialmente no ponto de vista de roteamento, a mobilidade implica em mudanças frequentes na topologia, que podem requerer atualizações de rotas, para refletir a nova organização topológica. Embora já existam diversas métricas de roteamento, atualmente essas métricas apenas qualificam os enlaces sem fio de acordo com o LQE que, no melhor de nossos conhecimentos, não levam em conta as características de mobilidade dos dispositivos.

Diante do acima exposto, a principal contribuição desta monografia é a proposição de um LQE chamado de *Mobile Expected Transmission Count* (MobETX), o qual incorpora características de mobilidade dos dispositivos ao ETX. O objetivo do estimador MobETX é melhorar a construção de rotas dos protocolos de roteamento (ex.: RPL) mesmo sob eventos de mobilidade dos dispositivos. Esta monografia também introduz o conceito da categoria de LQEs híbridos, estendendo a classificação proposta em (BACCOUR et al., 2012). A categoria de LQEs híbridos, abrange os LQEs que são simultaneamente baseados em *hardware* e *software*, como é o caso do MobETX. Em nossos experimentos, o MobETX apresentou melhora na taxa de entrega de pacotes de ao menos 5%, em situações onde a mobilidade dos dispositivos é presente, quando comparada com outras métricas (ex.: Métricas baseadas em *hop-count* e ETX). E em cenários estáticos, o MobETX se comporta como o ETX entregando > 98% dos pacotes quando uma rota existe e sem uso de mecanismos de confirmação.

Esta monografia está disposta de acordo com a seguinte estrutura: O capítulo 2 apresenta os trabalhos relacionados. No capítulo 3 é apresentado o LQE híbrido MobETX. O capítulo 4 são apresentados os cenários dos experimentos, além dos detalhes de implementação e configuração, o capítulo 5 disserta sobre os resultados obtidos dos experimentos, por fim, o capítulo 6 conclui a monografia e apresenta os trabalhos futuros.

2 Revisão bibliográfica

Este capítulo inicia com uma introdução sobre o protocolo de roteamento RPL, bem como sua intersecção com o estimador MobETX. Na sequência, LQEs propostos na literatura são colocados em perspectiva e o MobETX é contextualizado.

2.1 O RPL

Em 2012, o *Routing over Low-power and Lossy networks (RoLL) working group*, um grupo que gerencia os tópicos de roteamento em IoT, padronizou o RPL¹ como o protocolo de roteamento para *Low-power and Lossy Networks (LLNs)* (SOBRAL et al., 2019). O RPL constrói uma estrutura chamada de *Destination-Oriented Directed Acyclic Graphs (DODAG)* para representar a rede como exibe a Figura 1(a). Um DODAG não possui ciclos e pode ser aterrado (*grounded*) ou flutuante (*floating*), isto é, aqueles que atendem aos requisitos de conectividade, onde a raiz do DODAG consegue fornecer conectividade a rede, e os que não.

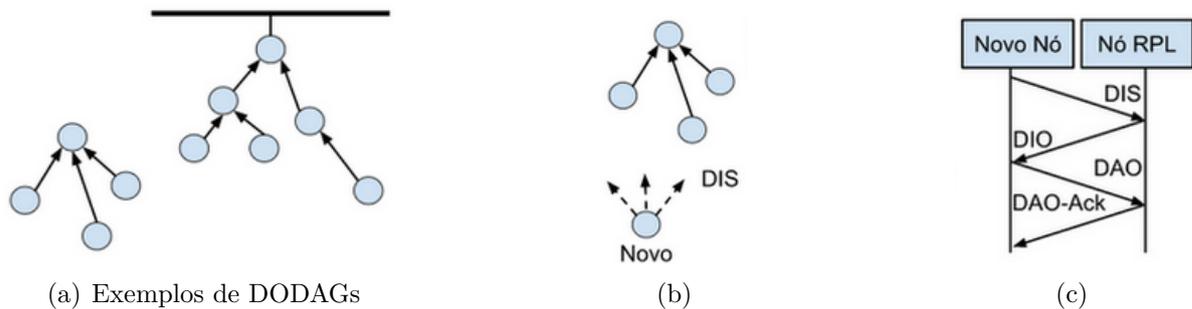


Figura 1 – RPL - Entrada de um novo nó e mensagens de controle

O RPL usa quatro mensagens de controle, sendo elas: i) *DODAG Information Solicitation (DIS)* utilizada para solicitar entrada em uma instância DODAG, onde o novo nó ainda não possui informações sobre a rede (veja a Figura 1(b)); ii) *DODAG Information Object (DIO)* para permitir que outros nós aprendam sobre DODAGs existentes e possam se juntar à estrutura. Para iniciar a construção da rede, o nó raiz envia uma mensagem DIO em *broadcast*¹ e todos os nós vizinhos que receberem esta mensagem, calculam seu *rank* para a raiz. Neste momento, o nó irá selecionar seu pai na rede, para isso utiliza a regra imposta pela Função Objetivo (OF), do inglês *Objective Function*, após o pai definido, o nó calcula seu *rank* e o envia através de um novo DIO para os nós vizinhos e este procedimento é repetido em todos os nós da rede; iii) *Destination Advertisement Object (DAO)* é uma solicitação de acesso ao DODAG que é enviada de um nó filho para seus

¹Uma mensagem destinada a todos os nós vizinhos ao nó emissor na rede

pais ou raiz do DODAG e; iv) *DAO-Ack* (DAO-Ack) que nada mais é que a confirmação de aceite ou não da raiz a uma solicitação de entrada de um nó no DODAG do RPL. A Figura 1(c) apresenta o processo de entrada de um novo nó a uma instância do RPL. Ao fim do processo, todos os nós possuem uma rota para a raiz com o melhor caminho possível de acordo com o estimador utilizado, mas ainda é necessário manter a rede atualizada.

Para fazer a atualização da rede, cada nó irá utilizar o *Trickle* (ZHENG, 2004), um algoritmo para propagação e manutenção de atualizações de código em redes sem fio. O *Trickle* utiliza uma estratégia de disseminação de dados denominada como "fofoca educada", também conhecida pelo termo em inglês *polite gossip*, onde os nós periodicamente transmitem uma mensagem DIO aos seus vizinhos com o valor de seu *rank* na rede. O *Trickle* é utilizado para evitar inundar a rede com mensagens e criar um fluxo de mensagens apenas quando necessário, pois os intervalos dos DIOs aumentam exponencialmente quando as condições da rede são estáveis, e diminui rapidamente, quando ocorrem mudanças na rede. O *Trickle* é um ótimo algoritmo para o RPL, pois assim como o RPL, é versátil e genérico, podendo ser usado em diferentes tipos de protocolos e redes.

O RPL é um protocolo genérico que se adapta a uma variedade de tipos de rede ao usar diferentes OFs². Uma OF declara o resultado do processo usado por um nó RPL para selecionar rotas em uma instância RPL com base nos DIOs recebidos³. Em resumo, uma OF é usada para selecionar nós que serão roteadores (isto é, nós que servem como pais ou possíveis sucessores) em direção a raiz da estrutura DODAG. Também, o RPL usa a OF para computar o *rank* de um dispositivo. Este *rank* é uma distância lógica entre a raiz e o nó. O *rank* é trocado entre os nós, através das mensagens de controle e essa informação é útil para evitar *loops*, por exemplo.

Uma OF, em consonância com as especificações do RPL, descreve como um nó selecionará parentes (na estrutura DODAG) em potencial a partir de sua vizinhança. A meta é encontrar o melhor caminho para a raiz da rede, consequentemente, melhorando a conectividade entre os nós da rede. Uma OF deve ser projetada para encontrar a raiz mais próxima, para tanto, um pai e um conjunto de possíveis pais são selecionados caso seja possível. Então, o tráfego em direção a raiz é encaminhado via o parente escolhido.

Na RFC 6552², é apresentada a Função Objetivo Zero (OF0) como uma OF básica para encontrar o *rank*. Essa métrica é similar ao hop-count, a qual computa a distância em saltos entre um nó e a raiz do DODAG. Porém, em LLNs, nem sempre o menor caminho em saltos, representa a melhor rota, por isso, é recomendado que estimadores, tais como o ETX (COUTO et al., 2005), sejam usados como base do processo para a computação do *rank* de um nó. Neste sentido, outras funções objetivo existem como, por exemplo, a

²RFC6552 (THUBERT et al., 2012)

³Uma Função Objetivo não é um algoritmo.

Minimum Rank Objective Function with Hysteresis (MRHOF)⁴. A escolha do novo pai preferido (pp_{novo}) é feita através da comparação do *rank*, do possível pai candidato (pc) com o pai preferido atual (pp_{atual}), tal como descrito na Equação 2.1. Observe que é indicado um limiar (λ) na Equação 2.1 que serve como fronteira para a troca de pai preferido, a esse processo é dado o nome de *Hysteresis*. Vale notar que outro LQE pode ser utilizado para escolha de novo pai, desde que sejam respeitadas as regras do RPL e da OF. Nesta direção, esta monografia aborda uma adaptação da OF para utilizar no MobETX, um LQE que considera a mobilidade dos nós.

$$pp_{novo} = \begin{cases} pc, & \text{se } (pc < pp_{atual} - \lambda). \\ pp_{atual}, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.1)$$

2.2 Classificação dos LQEs

Diversos LQEs, estimadores de qualidade de enlace, foram propostos ao longo do tempo como mostra a Figura 2. Em (BACCOUR et al., 2012), os autores propõem uma classificação para os LQEs até então existentes. A princípio, os LQEs foram classificados como aqueles baseados em *hardware* ou em *software* (observe a Figura 3). Nós também concordamos com tal classificação e taxonomia. Porém, vamos além ao estendê-la para acomodar também LQEs recentes, em um grupo que chamamos de LQEs híbridos, isto é, aqueles que estão na interseção entre uso de *hardware* e *software*. No melhor de nossos conhecimentos esses LQEs não consideram características de mobilidade. A seguir, apresentamos esses tipos de LQEs.

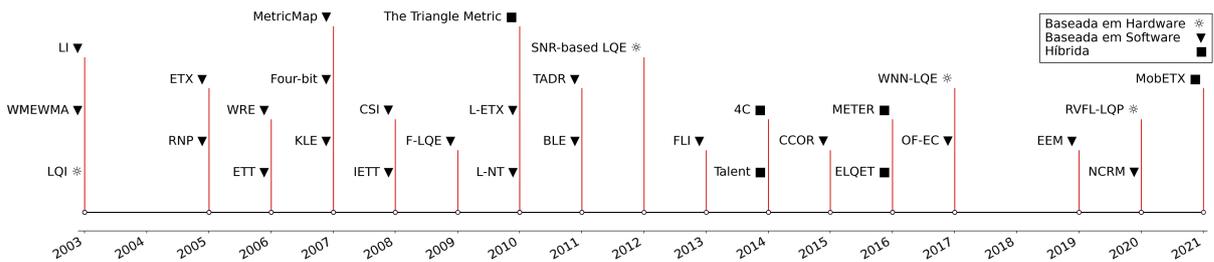


Figura 2 – Linha do tempo dos LQEs.

Os LQEs baseados em *hardware* leem as informações do sinal recebido diretamente do transceptor de rádio para determinar a qualidade do enlace. A principal vantagem desta abordagem é a sua simplicidade e a não necessidade de computação adicional. Entretanto, esses LQEs conseguem ler apenas pacotes recebidos, tornando difícil, por exemplo, a classificação de enlaces com alta taxa de perda de pacotes e, como consequência, podem superestimar os enlaces. Exemplos de LQEs desta categoria, serão apresentados a seguir.

⁴RFC6719 (GNAWALI; LEVIS, 2012)

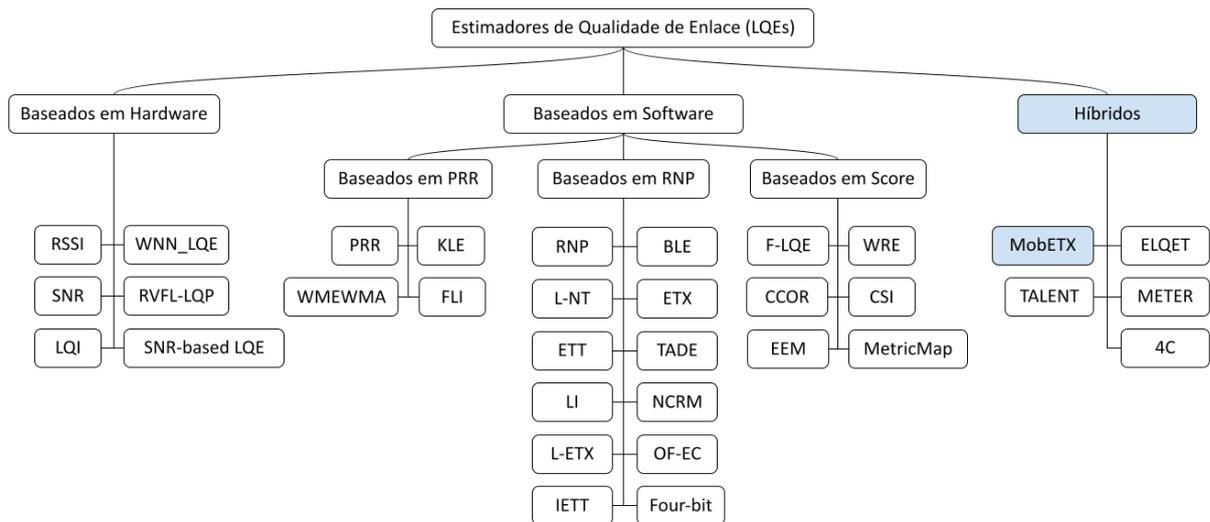


Figura 3 – Classificação dos LQEs.

- Received Signal Strength Indication (RSSI)** Representa a força do sinal recebido, é a soma do sinal recebido e do ruído do ambiente. Fornece uma estimativa rápida e precisa se um enlace é de altíssima qualidade. Existe um valor de RSSI (-87 decibel miliwatt (dBm)) ao se considerar redes típicas de LLNs, que a taxa de recepção de pacotes é superior a 99%, e em valores abaixo deste limite, mudanças de 2dBm podem alterar a qualidade de um enlace significativamente. Outro fator notável ao RSSI é sua estabilidade, ou seja, em um curto intervalo de tempo, uma única leitura do RSSI é necessária para averiguar a qualidade do enlace (BACCOUR et al., 2012).
- Link Quality Indicator (LQI)** Determina se o enlace é de boa qualidade ou não, mas, somente é indicado em enlaces de alta qualidade, pois devido sua alta variação, necessita de um número considerável de leituras (intervalo de 40 a 120 pacotes) para conseguir indicar a qualidade de enlaces de qualidade média ou baixa. Apesar desta variância do LQI, pode ser preferível usá-lo no lugar do RSSI, pois possui uma correlação mais precisa com a taxa de recepção de pacotes. A comparação entre o RSSI e o LQI para definir o melhor a ser utilizado, é na verdade uma questão sem resposta devido a diversas opiniões e resultados contraditórios (BACCOUR et al., 2012).
- Signal to Noise Ratio (SNR)** Descreve o quão forte é o sinal puro recebido em comparação com o ruído do receptor, para isso, o SNR possui uma taxa de erro de bit esperada que pode ser extrapolada para determinar a taxa de perda de pacotes. É um bom indicador e até mesmo preditor da taxa de perda de pacotes, mas não é preciso, especialmente para enlaces intermediários. Estudos concluíram que o SNR não deve ser usado como um estimador autônomo, mas deve ser usado para ajudar a aumentar a precisão da estimativa de perda de pacotes (BACCOUR et al., 2012).

- **SNR-based Link Quality Estimation** Proposto em (TAN; HU; PORTMANN, 2012), este LQE constrói um perfil SNR a fim de prever o *Packet Delivery Ratio* (PDR), taxa de entrega de pacotes, e então o *Frame Delivery Ratio* (FDR), performance do tráfego de dados *unicast*⁵, em diferentes taxas de transmissão. A partir do FDR é possível estimar com precisão a taxa máxima de transferência de um enlace sem fio e assim prever qual a melhor rota disponível para o tráfego dos pacotes.
- **Wavelet-Neural-Network-based Link Quality Estimation (WNN-LQE)** Desenvolvido para preencher a lacuna entre os requisitos de qualidade de serviço de redes inteligentes e os recursos de enlaces de rádio. Estima os limites da probabilidade do *Packet Reception Rate* (PRR) obtido a partir da decomposição do SNR em dois fatores: A parte não linear variável no tempo e uma parte aleatória não estacionária, onde cada componente é processado separadamente e depois inserido no modelo proposto (SUN et al., 2017).
- **Random-vector-functional-link-based LQP (RVFL-LQP)** Utiliza o SNR decomposto em uma sequência variável no tempo e uma sequência estocástica de acordo com a análise das características do enlace sem fio, então a rede proposta é usada para prever o limite do intervalo de probabilidade garantida do SNR, onde futuramente, os autores pretendem estudar sua confiabilidade em redes de múltiplos saltos (XUE et al., 2020).

Por outro lado, existem os LQEs baseados em *software*. Dentro desta categoria, existem outras três subclasses: i) LQEs baseados em PRR; ii) LQEs baseados em *Required Number of Packet retransmissions* (RNP) e; iii) LQEs baseados em *score*. Os quais são comentados a seguir:

- i) **LQEs baseados em PRR:** Consideram a taxa de recepção de pacotes. São implementados do lado do receptor, simples de medir e tem sido amplamente usados em protocolos de roteamento. Sua eficiência está diretamente ligada a janela de tempo definida para realizar as medições. Nesta categoria temos quatro estimadores, que serão explicados a seguir:
 - **Packet Reception Rate (PRR)** É calculado como a proporção entre o número de pacotes recebidos com sucesso e o número de pacotes transmitidos, pois é esperado que para todo pacote enviado seja recebido um pacote de confirmação de recebimento, ou seja, um pacote *acknowledgement* (ACK).

⁵Uma mensagem destinada a um único nó vizinho na rede

- ***The Window Mean with Exponentially Weighted Moving Average (WMEWMA)*** Seu funcionamento é baseado em monitoramento passivo, aplica o filtro *Exponentially Weighted Moving Average* (EWMA) para fornecer uma estimativa mais estável e suficientemente ágil da taxa de perda de pacotes. O WMEWMA foi comparado em (WOO; CULLER, 2003) a outros LQEs baseados em filtro e conseguiu superar todos em tempo de estabilização, precisão, estabilidade e eficiência (complexidade de computação) (BACCOUR et al., 2012).
 - ***The Kalman Filter Based Link Quality Estimator (KLE)*** Apresentado em 2007, o KLE tem como objetivo fornecer uma estimativa de qualidade do enlace com base em um único pacote recebido dentro da janela estimada. Ao receber um pacote, o *Received Signal Strength* (RSS) é extraído e é aplicado em um filtro de Kalman, para estimar o valor do RSS, logo após é feita uma aproximação do valor do SNR subtraindo-se o ruído estimado. Usando uma curva PRR-SNR pré-calibrada no receptor, o SNR aproximado é mapeado para um PRR aproximado, que representa a estimativa de qualidade dos enlaces. A precisão deste LQE está diretamente relacionado à precisão da curva PRR-SNR, considerada constante ao longo do tempo, mas em observações posteriores, foi observado que esta curva varia ao decorrer do tempo (em ambientes dinâmicos) e entre nós (BACCOUR et al., 2012).
 - ***Fuzzy Logic Based Link Quality Indicator (FLI)*** Mais recentemente, em 2013, foi apresentado em (GUO et al., 2013), como um LQE que utiliza lógica Fuzzy, tendo como entrada o PRR, o coeficiente de variância do PRR e uma métrica própria denominada *The Distribution Correlation* que representa a confiabilidade dos enlaces. Foi comparado pelos autores com o Four-bit, que será apresentado posteriormente, e exposto que o FLI reduz o comprimento médio das rotas da rede e reduz mudanças na topologia da rede, mantendo um alto nível de taxa de entrega dos pacotes ao custo de utilizar mais memória.
- ii) **LQEs baseados em RNP:** Consideram o número requerido de transmissões de um pacote. São implementados do lado do emissor, o qual deve contar o número médio de transmissões/retransmissões de pacotes necessários antes da recepção bem-sucedida. Nesta categoria se enquadram doze LQEs, apresentados a seguir:
- ***Required Number of Packet retransmissions (RNP)*** Assume um protocolo *Automatic Repeat Request* (ARQ) no nível da camada de enlace, um nó repetirá a transmissão de um pacote até que ele seja recebido corretamente e é calculado através da equação 2.2 (BACCOUR et al., 2012).

$$\frac{\text{Número de pacotes transmitidos e retransmitidos}}{\text{Número de pacotes recebidos com sucesso} - 1} \quad (2.2)$$

- **Link Inefficiency (LI)** É uma aproximação de RNP, definido como o inverso da probabilidade de sucesso de envio do pacote, o que é um PRR aproximado. Esta abordagem foi escolhida, pois os autores assumem que o PRR requer a recepção de vários pacotes, ou seja, uma grande janela de tempo, inadequado para LLNs devido ao alto consumo energético (LAI et al., 2003; BACCOUR et al., 2012).
- **Expected Transmission Count (ETX)** É um dos LQEs mais notórios atualmente, sendo uma melhoria ao *HopCount*, com o objetivo de encontrar o melhor caminho com o menor número de transmissões e retransmissões, levando em consideração a perda de pacotes e a assimetria do enlace. O ETX é calculado através da equação 2.3, onde d_f é a probabilidade do pacote ser entregue com sucesso e d_r é a probabilidade do pacote ACK ser recebido com sucesso (COUTO et al., 2005).

$$\frac{1}{d_f \times d_r} \quad (2.3)$$

Para o cálculo do ETX, d_f é substituído pela probabilidade do pacote ser enviado com sucesso, onde para uma taxa de 100% de probabilidade é utilizado o valor 1, assim como d_r é substituído pela probabilidade do pacote ACK ser recebido com sucesso.

Os autores mostram que os protocolos de roteamento baseados no ETX possuem alto rendimento em redes sem fio de múltiplos saltos, pois minimiza o número esperado de transmissões e retransmissões para entregar um pacote com sucesso. O ETX possui alguns pontos a serem destacados como: É baseado nas taxas de entrega, que afetam diretamente o rendimento da rede; Detecta e trata a assimetria dos enlaces, incorporando taxas de perda em ambas as direções; Pode usar medições precisas de taxa de perda de enlace para tomar decisões entre as rotas; Penaliza rotas com mais saltos; Tende a minimizar o uso da largura de banda, o que maximiza a capacidade geral da rede e tende a diminuir a energia gasta na rede, pois reduz a quantidade de pacotes transmitidos.

- **Expected Transmission Time (ETT)** Apresentado em (BAHR; WANG; JIA, 2006), é uma variação do ETX que leva em conta a largura de banda disponível nos enlaces. É calculado através da seguinte fórmula:

$$ETT = ETX \times \frac{\text{Tamanho do pacote}}{\text{Largura de Banda}} \quad (2.4)$$

- **Improved Expected Transmission Time (IETT)** Como o ETT não considera os atrasos no envio e diferenças nas taxas de perda dos enlaces, foi proposto um novo LQE chamado IETT, uma versão modificada e mais complexa do ETT, ao considerar atrasos do protocolo 802.11 MAC (LOWRANCE; LAUF, 2017; BIAZ; QI; JI, 2008).

- **FOUR-BIT** Foi projetado para fornecer quatro *bits* de informação. O *bit* branco é da camada física e permite identificar se o enlace utilizado durante a transmissão de um pacote foi de boa qualidade. O bit ACK é da camada de enlace e indica se uma confirmação é recebida para um pacote enviado. O bit de *pin* é usado para impedir a remoção do enlace, pois este está em uso. Por último, o *bit* de comparação que o estimador pode usar para perguntar à camada de rede se um enlace é promissor. O *FOUR-BIT* avalia a qualidade do enlace como uma aproximação da contagem de retransmissões do pacote, combinando dois estimadores através do filtro EWMA. O primeiro estimador é o RNP, calculado com base nos pacotes transmitidos. O segundo estimador é o inverso de WMEWMA menos 1, calculada com base nos *beacons* recebidos (BACCOUR et al., 2012; FONSECA et al., 2007).
- **L-NT e L-ETX**⁶ São dois LQEs que se aproximam do RNP. O L-NT conta o número de transmissões para entregar um pacote com sucesso e então aplica o filtro EWMA. Por outro lado, L-ETX calcula a razão entre o número de pacotes confirmados e o número total de pacotes transmitidos com base em uma determinada janela de tempo, onde o filtro EWMA é aplicado somente ao número de pacotes transmitidos. Estudos demonstram que o L-ETX é mais preciso na estimativa do que o L-NT e também mais estável. No entanto, o L-NT, possui uma maior taxa de entrega de dados e eficiência energética (BACCOUR et al., 2012; ZHANG; SANG; ARORA, 2010).
- **Traffic-aware Dynamic Routing (TADR)** Define a rota a ser escolhida baseado no congestionamento da rede. Calcula este congestionamento através da profundidade e comprimento da fila de pacotes, evitando rotas congestionadas ao longo do caminho (REN et al., 2011).
- **Bursty Link Estimator (BLE)** Um LQE a fim de classificar os enlaces com períodos curtos e repentinos de atividade, apresentado em (ALIZAI et al., 2011). Posteriormente, os autores mostraram em (ALIZAI; LANDSIEDEL; WEHRLE, 2012) que transmitindo em longo alcance com enlaces intermediários, o número de transmissões na rede pode ser reduzido. Um estimador que tende a mudar frequentemente a topologia da rede, o que pode não ser o ideal para as LLNs.
- **Objective Function Based Combined Metric using Fuzzy Logic Method (OF-EC)** Mescla os valores do ETX, consumo de energia do nó e o valor obtido do *HopCount* utilizando lógica *fuzzy*. Possui uma performance superior ao ETX em entrega de pacotes e consegue equilibrar o uso de energia da rede, aumentando a vida útil dos nós na rede (LAMAASI; BENAMAR, 2017). Um

⁶A letra “L” nas siglas L-NT e L-ETX significa “*Learn on the fly*”, expressão que indica algo feito rapidamente e provavelmente sem preparo prévio. NT significa “Número de transmissões físicas”.

LQE promissor, mas que necessita testes em diferentes cenários, para comprovar sua eficácia.

- ***Neo-hybrid Composite Routing Metric (NCRM)*** É uma melhoria ao ETX, calculada através do desvio Padrão do ETX em conjunto com uma função de consumo de energia do nó. Como resultado, melhorou a taxa de entrega de pacotes, consumo de energia, latência e controle de tráfego (CHARLES; PALANISAMY, 2020).

iii) **LQEs baseados em *SCORE***: Consideram informações obtidas a partir do *software* do dispositivo (Ex.: Taxa de recepção de pacotes, estabilidade do enlace, nível de assimetria do enlace, ruído do canal, localização, distância dos nós, e outros). Implementados do lado do emissor, utilizam os dados obtidos e critérios próprios, para fornecerem uma pontuação ou um rótulo de qualidade ao enlace. A seguir serão detalhados os seis LQEs desta categoria em ordem cronológica.

- ***The Weighted Regression Estimator (WRE)*** Assume que a força do sinal está correlacionada com a distância dos nós, então para fazer seus cálculos, o WRE deriva uma função de regressão baseada em um vetor de entrada, com as localizações e qualidade dos nós de seus enlaces conhecidos anteriormente. A função é constantemente atualizada com um novo conjunto de entradas para retornar à qualidade estimada do enlace.
- ***MetricMap*** Usa um vetor de recursos como entrada, este vetor consiste em um conjunto de métricas que afetam a qualidade do enlace, este vetor é aplicado à um algoritmo que classifica o enlace em um conjunto de classes (Ex.: “Bom” ou “Ruim”). Este algoritmo depende de uma fase de treinamento, realizada por meio de um banco de dados de amostra de treinamento.
- ***Channel State Information (CSI)*** É calculado através da normalização do RSSI e do LQI, considerados pelos autores como complementares, pois possuem propostas opostas. O RSSI qualifica quão bom é um enlace de alta qualidade, enquanto o LQI qualifica o quão ruim é um enlace de baixa qualidade (PUCCINELLI; HAENGGI, 2008).
- ***Fuzzy Link Quality Estimator (F-LQE)*** Estima a qualidade do enlace usando quatro propriedades. *Smoothed Packet Reception Ratio (SPRR)*, avalia a entrega de pacotes do enlace e é basicamente o PRR suavizado. *Link Stability Factor (SF)*, usado para avaliar a estabilidade do enlace, calculado com base em um histórico de 30 PRRs. *Link Asymmetry Level (ASL)*, usado para calcular a assimetria do enlace, medindo a diferença entre o PRR de envio e o de recepção. *Channel Average Signal to Noise Ratio (ASNR)*, usado para avaliar o canal de comunicação, é calculado através da média de n SNRs. Com essas propriedades,

é gerado uma pontuação, que é posteriormente suavizada através do filtro EWMA para fornecer estimativas de qualidade de enlaces estáveis (BACCOUR et al., 2012; BACCOUR et al., 2010).

- ***Optimizing Routing Based on Congestion Control (CCOR)*** Estima a qualidade do enlace através de duas funções, o *Link gradient* e o *Traffic radius*, que decidem as rotas baseadas no fluxo dos enlaces. A solução apresentada em (DING; TANG; JI, 2016) mostra nas simulações realizadas pelos autores que o CCOR diminui significativamente a taxa de perda de pacotes e mantém alta eficiência energética sob diferentes cargas de tráfego.
- ***Energy Estimation Metric (EEM)*** Estima a qualidade do enlace através de medidas extraídas da interface de rede, tensão da bateria, a corrente e o tempo de execução do dispositivo de comunicação no modo de envio de pacotes e no modo de escuta e recepção de pacotes. Os autores (PEREIRA; MORITZ; FONSECA, 2019) mostram que o EEM melhorou a distribuição energética da rede, prolongando o tempo da vida da rede em até 18,5% (intervalo de envio de 10 segundos) e reduziu o atraso na entrega de pacotes fim-a-fim em até 13,2%.

Nesta monografia, introduziremos o conceito de LQEs híbridos de forma a estender a classificação apresentada em (BACCOUR et al., 2012). Os LQEs híbridos, são aqui propostos para acomodar LQEs que simultaneamente usam informações de *hardware* e *software* no auxílio da construção de rotas (Ex.: Na computação do *rank* do nó e escolha dos possíveis pais do RPL). A abordagem aqui proposta, chamada de MobETX, leva em conta o ETX clássico, que é um estimador baseado em software, além de informações de mobilidade (Ex.: Velocidade do nó, duração e quantidade de enlaces ao longo da mobilidade dos nós) que são obtidos através de hardware (Ex.: *Global Position System* (GPS) e acelerômetro). Devido ao ETX e as métricas de mobilidade utilizadas, que são obtidas através do *hardware*, o MobETX se enquadra como LQE híbrido, assim como outras propostas detalhadas a seguir.

- **The triangle metric** Usa o PRR, o LQI e o SNR em uma combinação geométrica. O LQI e o SNR são usados para calcular a distância da origem do pacote recebido. Foi observado pelos autores, que não há uma forte correlação entre o PRR e a distância da origem, sendo importante mantê-lo no cálculo. O resultado final é um estimador robusto, com uma estimativa confiável utilizando uma janela de 10 pacotes, janela considerada razoável para compensar a precisão, custo e o tempo de estimativa (BOANO et al., 2010).
- **4C** Proposto em (LIU; CERPA, 2014a), foi desenvolvido a partir de três etapas: Coleta de dados, modelagem *offline* e previsão *online*. A etapa inicial consiste

em coletar dados de qualidade do enlace. A etapa seguinte, modelagem *offline*, inclui treinamento e seleção de modelo de predição *offline*, podendo escolher entre classificador Naive Bayes, regressão logística e redes neurais artificiais. Os modelos apresentados utilizam uma combinação de PRR, RSSI, SNR e LQI e possuem como saída a probabilidade de sucesso de entrega do próximo pacote. A terceira etapa, consiste em implementar o 4C, um LQE que computa a qualidade do enlace em tempo curto, nos resultados expostos pelos autores, é indicado uma melhora de 20% a 30% em relação ao *Collection Tree Protocol* (CTP).

- ***Temporal Adaptive Link Estimator with No offline Training* (TALENT)** Apresentado por (LIU; CERPA, 2014b), implementado como uma extensão do protocolo CTP, utiliza o valor do LQI do pacote recebido e combina com o PRR fornecido pelo *FOUR-BIT*, utilizando aprendizado de máquina *online*, a fim de prever a qualidade do enlace em um futuro imediato, de acordo com os autores, o TALENT aumenta a eficiência de entrega de pacotes em 1,95 vezes em média, quando comparado com o LQE *FOUR-BIT*.
- ***Enhanced Link Quality Estimation Technique* (ELQET)** Desenvolvido em (JAYASRI; HEMALATHA, 2017), focado em *streaming* de dados para o padrão de comunicação ZigBee, recebe como entrada os valores de RSSI e LQI, utilizando o filtro de Kalman sobre o RSSI e pré processamento sobre o LQI, produz quatro estimadores sendo eles: ASNR, o atributo de estabilidade medido através da variância do PRR, *Average Link Quality Indicator* (ALQI) e o PRR. A combinação desses estimadores em uma lógica *Fuzzy*, resulta na estimação da qualidade do enlace.
- ***Distributed Frame Counter* (METER)** Desenvolvida como complemento ao *FOUR-BIT*, o METER é um LQE para obter uma estimativa precisa e em tempo real em LLNs sem fio a partir da combinação do RSSI, informações da camada de rede, camada de enlace e camada física, conseguindo melhorar a precisão do *FOUR-BIT* (LIU et al., 2016).
- ***Mobile Expected Transmission Count* (MobETX)** O estimador aqui apresentado, e que será detalhado no capítulo 3.

2.3 Métricas de mobilidade

Métricas de mobilidade são medidas quantitativas que representam diversos aspectos da mobilidade humana e podem ser extraídas durante a movimentação de um dispositivo. Essas métricas são usadas para analisar o comportamento dos dispositivos ao longo de sua rota. Algumas destas métricas serão escolhidas para serem usadas no MobETX.

As métricas de mobilidade podem ser categorizadas em sociais, espaciais e temporais. As métricas sociais estão diretamente relacionadas a conectividade dos dispositivos e nos ajudam a explicar como os dispositivos se conectam entre si e algumas propriedades dessa conexão; As métricas espaciais estão relacionadas com o movimento do dispositivo e nos fornecem uma noção sobre as distâncias percorridas por cada nó; Por fim, métricas temporais, estão relacionadas a rotina dos dispositivos e nos indicam como ocorre a repetição da movimentação dos nós. As métricas de mobilidade descritas a seguir, foram apresentadas em (University of Osnabrück, 2016; SOUZA et al., 2018).

- **Velocidade média** É calculada através da posição inicial e final do dispositivo e do tempo gasto para percorrer tal distância.
- **Velocidade média relativa** Velocidade média relativa a todos os nós da rede, descrita em (JOHANSSON et al., 1999).
- **Mobilidade relativa** É uma função do movimento relativo dos nós que participam da rede, que não depende do raio de transmissão do nó. A medida de mobilidade, entre qualquer par de nós, é definida como sua velocidade relativa absoluta tomada como uma média ao longo do tempo, portanto, a mobilidade indica a velocidade relativa média entre todos os nós da rede. Consequentemente, a mobilidade para um grupo de nós parados ou movendo-se em paralelo na mesma velocidade, é zero. Mais detalhes podem ser vistos em (JOHANSSON et al., 1999).
- **Grau médio de dependência temporal** Indica a dependência da velocidade do nó em relação a sua velocidade em algum momento anterior. Se a velocidade atual do nó é completamente independente do momento anterior, é esperado um grau de dependência menor, consequentemente, se a velocidade atual for completamente dependente do momento anterior, é esperado um valor maior. Esta métrica é independente do raio de transmissão dos nós.
- **Grau médio de dependência espacial** Indica o quanto os movimentos dos nós são influenciados uns pelos outros. A dependência espacial é uma função da aceleração do nó móvel e das restrições geográficas. O valor da dependência espacial é alto quando os nós viajam em direções aproximadas e em velocidades semelhantes e diminui se a direção relativa ou a Razão de Velocidade entre os nós diminuir.
- **Grau médio do nó** Indica a quantos nós um determinado nó está conectado diretamente em um determinado momento.
- **Número médio de partições** Indica se os nós da rede sempre estão conectados ao restante da rede, neste caso, 1 significa que a rede está sempre conectada, valores maiores que 1 indicam o oposto.

- **Grau de particionamento** A probabilidade de que dois nós escolhidos aleatoriamente não estejam dentro do mesmo componente conectado em um momento escolhido aleatoriamente.
- **Tempo médio para quebra de *link*** Tempo médio que os enlaces são desfeitos. Somente enlaces que foram criados após o início da simulação e encerrados antes do final da simulação são levados em consideração. Se utilizado entre pares, pode ser um indicativo da estabilidade do enlace entre os nós.
- **Desvio padrão de tempo para quebra de *link*** Desvio padrão do tempo médio que os enlaces são desfeitos, calculado a partir do item acima, mantendo a característica de considerar apenas enlaces que foram criados após o início da simulação e encerrados antes do final da simulação.
- **Quebras de *link*** O número total de enlaces que foram criados após o início da simulação e encerrados antes do final da simulação.
- **Duração média do *link*** Similar ao tempo de quebra do enlace descrito anteriormente, mas, neste caso todos os enlaces são considerados.
- **Número total de *links*** Soma da quantidade total de enlaces realizados em toda a rede, por todos os nós.
- **Disponibilidade média do caminho** Média da fração de tempo em que um par de nós está conectado. Os pares de nós relevantes para esta métrica, são os que possuem tráfego de comunicação, apresentada em (BAI; SADAGOPAN; HELMY, 2003).
- **Número médio de mudanças de *link*** É o número de vezes que os enlaces entre um par de nós mudam de “desconectado” para “conectado”.
- ***Inter-contact time* (INCO)** Indica o intervalo de tempo entre as conexões de um par de nós, representando a oportunidade para um nó entregar uma determinada mensagem. Esta métrica é extraída registrando o tempo entre dois contatos consecutivos em relação a cada par específico de nós.
- ***Contact duration* (CoDU)** Indica o tempo em que dois nós estão conectados, nos ajuda a entender por quanto tempo um enlace ocorre, ou seja, quantos dados podem ser transferidos durante um enlace. É gerada ao se registrar a duração de cada contato entre qualquer par de nós.
- ***Maximum contacts per hour* (MaxCON)** Indica quantos contatos entre dois nós são feitos por hora. Por se tratar de uma métrica de conectividade, nos dá direções quanto às diferentes oportunidades de envio de uma mensagem que um dado nó tem durante cada hora do dia e, em quais partes do dia.

- ***Encounter regularity (EDGE)*** Mapeia as relações sociais entre os nós. Representa a possibilidade de entrega de uma mensagem em um determinado intervalo de tempo. É obtida calculando a persistência dos encontros entre cada par de nós durante o tempo de simulação, nos dando uma visão sobre a sociabilidade dos nós da rede.
- ***Topological overlap (TOPO)*** Representa a sobreposição social entre um par de nós, TOPO pode ser útil para determinar oportunidades de enlaces para transmitir mensagens dentro dos grupos sociais. Naturalmente, é mais fácil entregar uma mensagem a um membro do mesmo grupo social do que a um membro externo.
- ***Radius of gyration (RADG)*** Representa a distância que cada nó está de sua casa. Tratando-se de mobilidade, quando se aplicam os fatores sociais, é comum supor que cada nó tenha um local denominado casa. Este local é um ponto escolhido aleatoriamente na área da rede. Para o cálculo do RADG é considerado o local mais visitado na rotina de cada nó e onde normalmente o nó retorna ao final do dia.
- ***Travel distance (TRVD)*** Indica a distância euclidiana entre o ponto inicial e final do nó, a análise desta propriedade nos ajuda a entender como os nós se deslocam de um lugar para outro. Essas informações podem ser exploradas, por exemplo, para melhorar a disseminação de mensagens em redes veiculares e oportunistas.
- ***Visit time (VISIT)*** Tempo gasto em cada local visitado por um nó. Normalmente, os nós tendem a parar seu movimento em locais específicos, a fim de realizar alguma tarefa. Embora a maioria das visitas seja curta, às vezes, os nós ficam mais do que o normal em um local específico.
- ***Travel time (TRVT)*** Tempo que um dado nó gasta se movendo entre dois pontos consecutivos. Quando comparada com a métrica TRVD, o comportamento observado é de que viagens longas são menos frequentes, mas exigem mais tempo para serem concluídas, enquanto viagens curtas são mais rápidas e comuns.
- ***ENTROPY*** Em cenários com mobilidade presente, é esperado que os nós desenvolvam vínculos sociais entre si e estes laços influenciam a maneira como os nós se movem de um lugar para outro. Mas também é possível afirmar que os nós desenvolvem vínculos sociais com as localidades. Para exemplificar, em cenários reais, as pessoas tendem a visitar com mais frequência lugares que são de alguma forma familiares para eles ou que são visitados por suas famílias, amigos ou conhecidos. Para entender quais locais são altamente frequentados, esta métrica quantifica as vezes que cada local recebe um nó.

3 Abordagem proposta

Neste capítulo, iremos apresentar o LQE aqui proposto. Iniciaremos com um *background* sobre o problema, seguido da apresentação e detalhamento da Estimativa de Mobilidade (EM) que junto com o ETX, compõem o MobETX.

3.1 Background

O ETX um LQE baseado em *software*, descrito no capítulo 2.2 item ii), é um dos LQEs com maior notoriedade atualmente (KASSAB; DARABKH, 2020). Ele foi desenvolvido como uma alternativa ao *Hop-Count*. Isso porque notou-se que em comunicações sem fio, nem sempre a menor rota (em número de saltos) provê o melhor desempenho na comunicação. Neste sentido, o objetivo do ETX é auxiliar no cálculo da rota com o menor número de transmissões e retransmissões, levando em consideração a perda de pacotes e a assimetria dos enlaces sem fio. O ETX foi escolhido para o MobETX, pois é o protocolo padronizado para uso no RPL, já tendo sua eficácia e robustez comprovada.

3.2 Um estimador híbrido: MobETX

Apresentamos aqui o MobETX, um estimador de enlace que se difere dos anteriormente citados, pois utiliza informações da mobilidade do dispositivo (obtidas através de sensores, por exemplo, o GPS). O MobETX estima a mobilidade do dispositivo e agrega este valor com o *rank* dado pelo ETX para estimar a qualidade do enlace, mantendo todas as características do ETX citadas previamente.

Para estimar a mobilidade dos dispositivos, utilizamos as métricas de mobilidade: velocidade média; duração média do enlace e número total de enlaces, que estão presentes nas Equações 3.1 e 3.2, representando a média de tempo de duração dos enlaces realizados pelo dispositivo e a média de velocidade do dispositivo respectivamente, onde i é o dispositivo em questão. Na equação 3.1, n é um enlace feito pelo nó i e Ω é o conjunto de todos os enlaces feitos pelo nó. Na Equação 3.2, v_i indica a velocidade média do dispositivo e v_{max} é a velocidade máxima que os dispositivos podem alcançar na rede. A partir das equações 3.1 e 3.2 obtemos a EM representada na Equação 3.3. A EM tem como objetivo estimar o quanto a mobilidade do dispositivo pode interferir no desempenho dos enlaces realizados por um dado nó, seu valor final está dentro do intervalo $[0,1]$, onde 0 indica que a mobilidade do nó, tem pouca interferência na qualidade dos enlaces que realiza e 1 indica o oposto. Na EM, τ se refere ao tempo que o dispositivo está conectado na rede e α é um valor entre $[0,1]$ responsável por balancear as Equações 3.1 e 3.2. É

importante observar que estas métricas de mobilidade foram escolhidas devido a sua fácil obtenção pelos nós, baixo custo e processamento, bem como a não necessidade de solicitar dados aos nós vizinhos o que acarretaria em mais transmissões de controle.

$$\Delta_i = \frac{\sum_{n \in \Omega_i} \text{duração}_n}{|\Omega_i|} \quad (3.1) \quad v_i = \frac{v_i \text{ avg}}{v_{max}} \quad (3.2)$$

$$EM_i = \left(\left(1 - \left(\alpha \cdot \left(\frac{\Delta_i}{\tau} \right) \right) \right) + ((1 - \alpha) \cdot v_i) \right) \quad (3.3)$$

$$MobETX = ((\beta \cdot ETX) + ((1 - \beta) \cdot EM \cdot \gamma)) \quad (3.4)$$

O MobETX é definido na Equação 3.4 e considera tanto o tradicional ETX quanto a Estimativa de Mobilidade. Na equação aparece o termo β , o qual é usado para ajustar o peso entre o ETX e a EM. Essas métricas possuem escalas diferentes, sendo assim γ é usado para ajuste da EM.

Para a implementação do MobETX, sugerimos a utilização da *Mobile Expected Transmission Count — Objective Function* (MobETX-OF) conforme Equação 3.5. A MobETX-OF é similar a MRHOF, mas utilizando-se o MobETX ao invés do ETX. A MobETX-OF seleciona seu nó pai a partir da comparação entre todos os nós de uma lista de possíveis pais, comparando dois a dois, os *Ranks* destes possíveis pais e escolhendo o menor valor entre eles. Para que haja uma troca eficiente de nó pai, é recomendado que se utilize o limiar mínimo de 8, ou seja, a troca, somente é realizada caso o *Rank* deste seja 8 unidades menor que o *Rank* do nó pai atual. Após a escolha, o dispositivo calcula seu próprio *Rank* a partir da Equação 3.5, onde $Rank_{base}$ é o valor de *Rank* do nó definido como pai e $Rank_{incremento}$ é o valor adicionado a cada salto para evitar laços de roteamento. É recomendado que os valores de $Rank_{base}$ e $Rank_{incremento}$ sejam 128. Após a definição do *Rank* atual do nó, este valor é divulgado a todos os nós vizinhos.

$$Rank = Rank_{base} + Rank_{incremento} + MobETX \quad (3.5)$$

4 Metodologia

Neste capítulo iremos abordar os métodos utilizados para realizar os experimentos e a avaliação dos resultados obtidos. Como ambiente de experimentação foi usado emulador de redes Cooja presente no Contiki-OS 3.0 (DUNKELS; GRONVALL; VOIGT, 2004). Os parâmetros utilizados para simulação são descritos na Tabela 1, demais parâmetros foram mantidos como no padrão do sistema Contiki-OS. Na tabela 2, podemos encontrar as configurações do *hardware* utilizado nos experimentos e na tabela 3 o quanto foi alocado para a máquina virtual do Contiki-OS 3.0. Vale ressaltar que a implementação do Contiki-OS 3.0 é serial, portanto, melhorias no *hardware* podem não ser diretamente refletidas no desempenho de realização dos experimentos.

Parâmetros do Contiki/Cooja	
# de nós	100
Modelo de conectividade	UDGM
Dimensão	1000 m × 1000 m
Tipos de nós	Cooja Mote
Protocolos	RPL, <i>Trickle</i>
Intervalo de transmissão de pacotes	300 s
Randomização de transmissão de pacotes	300 s
Tempo de simulação	24 h

Tabela 1 – Parâmetros do Contiki/Cooja.

Hardware utilizado para experimentação	
Processador	i5-9400F @4006 MHz
Memória	16 GB DDR4 @3200 MHz
Placa de vídeo	GTX 1650 4 GB GDDR6 @1995 MHz

Tabela 2 – Especificações do *hardware* utilizado nos experimentos.

Máquina virtual do Contiki-OS 3.0	
Software utilizado	Oracle VM Virtual Box
Núcleos de processamento	5/6
Memória alocada	14 GB/16 GB
Espaço em disco	20 GB

Tabela 3 – Especificações da máquina virtual utilizada nos experimentos.

Para estudar o efeito da mobilidade na taxa de entrega de dados usando os estimadores MobETX e ETX usamos um esquema de experimento fatorial 2^k . O experimento

fatorial 2^k é uma técnica para organizar diversos experimentos sobre um determinado assunto, de forma a investigar diversos fatores simultaneamente para posteriormente afunilar a investigação naqueles que se mostrem mais relevantes, reduzindo custos e tempo do projeto a ser analisado. Nesta técnica o número de experimentos cresce numa progressão geométrica de razão 2, gerando 2^k experimentos, origem de seu nome, onde k corresponde a quantidade de fatores que serão testados.

A mobilidade dos dispositivos é um fator que influencia no desempenho das métricas que estimam a qualidade dos enlaces, sendo, portanto, considerada. Ademais, na confecção do MobETX, três outros fatores possuem destaque e podem impactar no seu desempenho, sendo eles: O limiar λ para troca do pai preferido (vide Equação 2.1), o α da Equação 3.3 que ajusta o compromisso entre média de duração dos enlaces e velocidade do dispositivo, e, por fim, o β da Equação 3.4, que faz o balanço do compromisso entre usar ETX e EM. Com base nesses 4 fatores ($k = 4$), foram realizados 16 experimentos. Dos quais, 8 foram em cenário estático, 8 em cenário móvel (O modelo random waypoint, foi escolhido por ser um dos modelos de mobilidade mais movimentados, onde é esperado então, que ao se utilizar modelos mais realistas de mobilidade, conseqüentemente menos movimentados, a melhora do MobETX em relação ao ETX tende a ser maior), além de um experimento adicional para cada cenário, utilizando somente o ETX, o qual pode ser entendido como uma base de referência inicial de desempenho do MobETX. As configurações de cada experimento estão descritas na Tabela 4.

#	Mobilidade	λ	α	β
1	estático	8	0.3	0.5
2	estático	16	0.3	0.5
3	estático	8	0.3	0.9
4	estático	16	0.3	0.9
5	estático	8	0.7	0.5
6	estático	16	0.7	0.5
7	estático	8	0.7	0.9
8	estático	16	0.7	0.9
9	estático	Não se aplica		
10	random waypoint	8	0.3	0.5
11	random waypoint	16	0.3	0.5
12	random waypoint	8	0.3	0.9
13	random waypoint	16	0.3	0.9
14	random waypoint	8	0.7	0.5
15	random waypoint	16	0.7	0.5
16	random waypoint	8	0.7	0.9
17	random waypoint	16	0.7	0.9
18	random waypoint	Não se aplica		

Tabela 4 – Experimentos a serem realizados.

Vale ressaltar que, os experimentos em cenário móvel foram realizados em três repetições e para os experimentos em cenários estáticos foram realizadas duas repetições, onde em cada repetição foi utilizada uma *seed*¹ de criação de cenário diferente e cada *seed* foi reaproveitada para a próxima configuração de experimentação, totalizando assim o uso de três *seeds* para todos os experimentos de configuração. A diferença nas quantidades de repetições se dá, devido ao cenário estático ter um tempo de processamento em torno de 8 a 10 vezes maior, tornando inviável mais repetições. Em conjunto com as repetições, foi adotado como procedimento, a intercalação dos LQEs, de modo que para cada novo cenário gerado, foi realizado o teste com o ETX e em seguida com o MobETX. Estes procedimentos foram realizados a fim de evitar favorecimentos ocasionais de qualquer um dos estimadores em experimentação pela *seed* utilizada.

¹Uma informação, neste caso numérica, usada por um *software* para a criação de um cenário, implicando que a mesma *seed*, no mesmo programa, em diferentes execuções, irá gerar resultados “aleatórios”, porém iguais em todas as execuções. Habitualmente usada para poder replicar testes.

5 Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir dos experimentos fatoriais 2^k . Na Figura 4 é possível comparar cada cenário experimentado com seu respectivo experimento de referência (aquele que usa somente o ETX). Ademais, nas Tabelas 5 e 6 são apresentadas as interações entre os fatores estudados e com isto, como cada um interfere no resultado final do experimento. As colunas λ , α e β , representam as variáveis de configuração das simulações¹ e a coluna *AVG* representa a média dos resultados obtidos na configuração de λ , α e β correspondente. Os valores das demais colunas é obtido ao se multiplicar o valor da *AVG* e das colunas iniciais correspondentes, nos dando o quanto a variável interferiu no experimento da linha em questão. A última linha das tabelas apresenta o *Valor de interação*, o qual representa o quanto uma determinada variável ou conjunto delas impacta nos resultados obtidos. Damos destaque para o α e β que apresentam os valores mais significativos (realçado nas tabelas), sendo, portanto os fatores que mais afetam os resultados, o que é justo pois, são exatamente os fatores que ajustam os compromissos referentes à mobilidade das entidades da rede e o balanceamento entre o ETX e a EM.

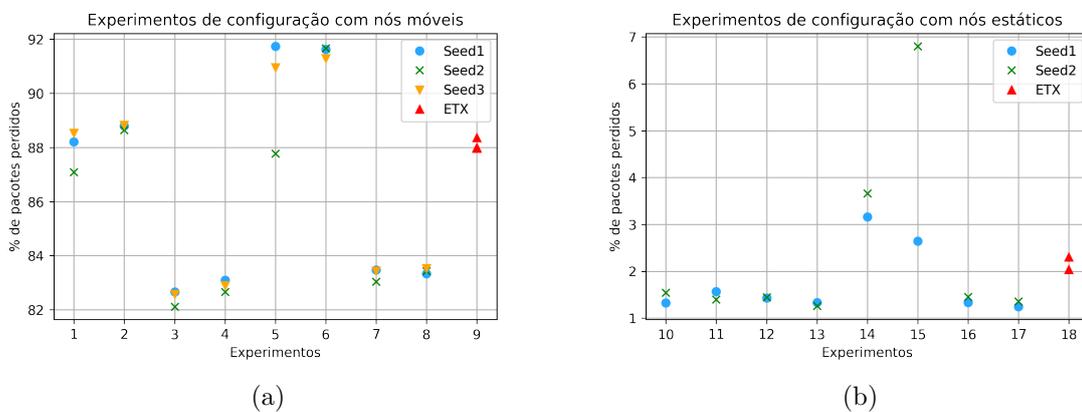


Figura 4 – Experimentos de configuração.

Para verificar se a variação dos fatores λ , α e β são significativos nos resultados obtidos, construímos as Tabelas 7 e 8 ANOVA. A tabela ANOVA tem como objetivo fazer uma análise estatística dos efeitos dos fatores em análise, a partir dos resultados obtidos nos experimentos. O que a tabela ANOVA faz, é a partir dos resultados obtidos, fazer uma comparação entre os grupos de experimentos, separados pelos fatores, conseguindo assim nos fornecer um valor de efeito estatístico para cada fator. A Tabela F nos dá se a

¹Variável em +1 para o maior valor e -1 para o menor valor possível para a determinada variável, conforme Tabela 4

λ	α	β	AVG	λ	α	β	$\lambda\alpha$	$\lambda\beta$	$\alpha\beta$	$\lambda\alpha\beta$	λ	α	β	AVG	λ	α	β	$\lambda\alpha$	$\lambda\beta$	$\alpha\beta$	$\lambda\alpha\beta$	
-1	-1	-1	87,94	-87,9	-87,9	-87,9	87,94	87,94	87,94	-87,9	-1	-1	-1	1,43	-1,43	-1,43	-1,43	1,43	1,43	1,43	-1,43	
1	-1	-1	88,75	88,75	-88,8	-88,8	-88,8	-88,8	88,75	88,75	1	-1	-1	1,48	1,48	-1,48	-1,48	-1,48	-1,48	1,48	1,48	
-1	-1	1	82,44	-82,4	-82,4	82,44	82,44	-82,4	-82,4	82,44	-1	-1	1	1,44	-1,44	-1,44	1,44	1,44	-1,44	-1,44	1,44	
1	-1	1	82,88	82,88	-82,88	82,88	-82,88	82,88	-82,88	-82,88	1	-1	1	1,30	1,30	-1,30	1,30	-1,30	1,30	-1,30	-1,30	
-1	1	-1	90,15	-90,2	90,15	-90,2	-90,2	90,15	-90,2	90,15	-1	1	-1	3,41	-3,41	3,41	-3,41	-3,41	3,41	-3,41	3,41	
1	1	-1	91,53	91,53	91,53	-91,5	91,53	-91,5	-91,5	-91,5	1	1	-1	4,72	4,72	4,72	-4,72	4,72	-4,72	-4,72	-4,72	
-1	1	1	83,31	-83,3	83,31	83,31	-83,3	-83,3	83,31	-83,3	-1	1	1	1,39	-1,39	1,39	1,39	-1,39	-1,39	1,39	-1,39	
1	1	1	83,42	83,42	83,42	83,42	83,42	83,42	83,42	83,42	1	1	1	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	
Valor de interação			0,68	1,59	-6,57	0,06	-0,4	-0,89	-0,22		Valor de interação			0,28	1,29	-1,40	0,32	-0,39	-1,31	-0,30		

Tabela 5 – Matriz de efeito dos fatores em cenários móveis. Tabela 6 – Matriz de efeito dos fatores em cenários estáticos.

Razão F, calculada na tabela ANOVA é ou não significativa para uma dada probabilidade. Nas Tabelas 7 e 8, a razão F é o resultado obtido na ANOVA a fim de ser comparado com o valor na tabela F e nos informar se este valor é estatisticamente significativo. Em nossos experimentos, ao se utilizar uma significância de 5% para ambos os cenários, obtemos na tabela F², o valor de 5,32 no cenário estático e 4,46 para o cenário móvel. Com estes valores, concluímos que a variação dos fatores α , β e de sua interação são relevantes no cenário estático e em cenário móvel, a variação de α e β tem efeito significativo em nossos resultados (em destaque nas tabelas). Concluímos, por fim, que α e β tem grande relevância no MobETX em ambos os casos, e, portanto, em trabalhos futuros, devem ser considerados na elaboração de novos LQEs de premissa similar.

Fator	Soma dos quadrados	graus de liberdade	Quadrado médio	Razão F	Fator	Soma dos quadrados	graus de liberdade	Quadrado médio	Razão F
λ	2,7973677	2	1,3986838	1,0701165	λ	0,3195881	1	0,3195881	0,2906174
α	259,6240735	2	129,8120367	99,3176565	α	7,8822810	1	7,8822810	7,1677508
β	15,3482521	2	7,6741260	5,8713832	β	6,6748314	1	6,6748314	6,0697567
$\lambda\alpha$	0,9998594	2	0,4999297	0,3824903	$\lambda\alpha$	0,6306541	1	0,6306541	0,5734852
$\lambda\beta$	0,0239234	2	0,0119617	0,0091517	$\lambda\beta$	0,4278915	1	0,4278915	0,3891030
$\alpha\beta$	4,7842652	2	2,3921326	1,8301924	$\alpha\beta$	6,9072746	1	6,9072746	6,2811289
$\lambda\alpha\beta$	0,2991444	2	0,1495722	0,1144359	$\lambda\alpha\beta$	0,3636942	1	0,3636942	0,3307253
Erro	10,4563108	8	1,3070388		Erro	8,7974944	8	1,0996868	
Total	294,3331969	22			Total	32,0037093	15		

Tabela 7 – Tabela ANOVA em cenário móvel. Tabela 8 – Tabela ANOVA em cenário estático.

Após observação das tabelas ANOVA e da Figura 4, o experimento 4 (limiar de troca do pai em 16 unidades, 30% da EM destinada a média de duração dos enlaces e 70% destinada a velocidade média dos dispositivos e, por fim, 90% de peso para o ETX e 10% para o MobETX) foi escolhido como a configuração padrão de experimentação, devido ao seu desempenho em ambas as situações. É importante observar nos resultados obtidos, que a EM atua como um ajuste fino do ETX, onde sem o auxílio do ETX, tem um pior desempenho, mas na proporção ideal, no valor de 90%, consegue melhorar o desempenho do ETX. A partir desta configuração foram realizados 15 experimentos com ambos LQEs a fim de verificar a variância dos resultados e analisar a viabilidade do MobETX. Os resultados destes experimentos podem ser visualizados na Figura 5.

²1 grau de liberdade para o numerador e 8 para o denominador no cenário estático. 2 graus de liberdade para o numerador e 8 para o denominador no cenário móvel.

Para finalizar os gráficos de comparação, a Figura 6 apresenta os resultados para se avaliar o intervalo de confiança dos experimentos, com uma confiança de 95% (distribuição T-Student). Nestes gráficos podemos perceber que o MobETX em um cenário móvel apesar de, uma variância maior entre seus resultados (variando 0,91 enquanto o ETX varia 0,20 pontos percentuais), possui uma melhora de aproximadamente 5% (uma média de 82,73% para o MobETX e 88,06% para o ETX) em relação a porcentagem de perda de pacotes, quando comparado aos resultados obtidos pelo ETX. Em cenário estático, mantém performance similar ao ETX com média de 1,32% de perda de pacotes contra 1,42% do ETX.

Os resultados obtidos durante esta monografia foram compilados em um artigo científico, que pretende-se publicar em veículos de divulgação científica.

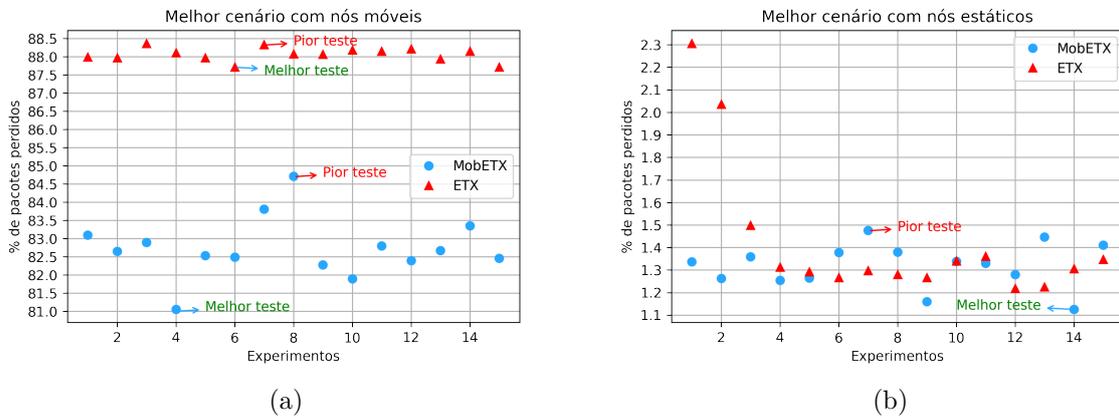


Figura 5 – Experimentos no melhor cenário.

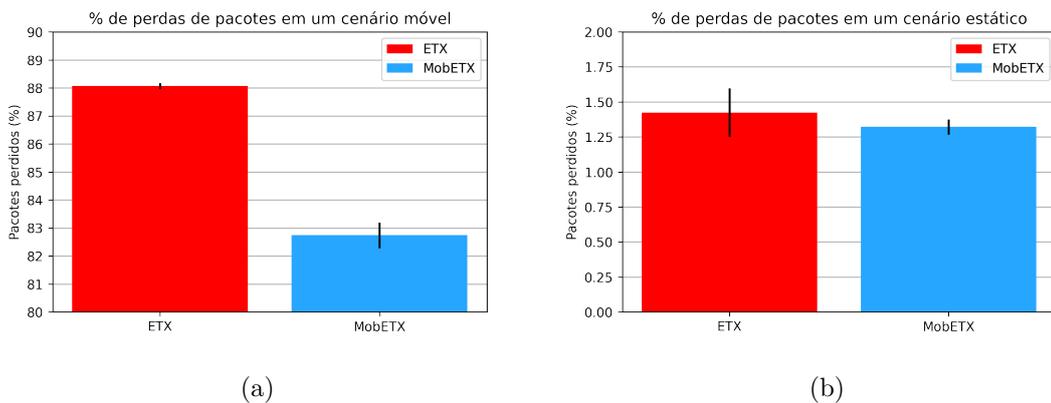


Figura 6 – Pacotes perdidos com intervalo de confiança nos experimentos com a melhor configuração.

6 Conclusão

Um novo estimador, chamado MobETX, foi apresentado nesta monografia. O MobETX, categorizado como um LQE híbrido, estima a qualidade do enlace utilizando métricas de mobilidade dos nós da rede em conjunto com o ETX para se obter uma melhora na taxa de entrega de pacotes da rede. Foram realizados experimentos, baseados no experimento fatorial 2^k para definir os valores adequados dos fatores de configuração. Após, foram realizados experimentos a partir da configuração escolhida em cenários com dispositivos móveis e em cenários com dispositivos estáticos, comparando os resultados obtidos com o desempenho do ETX nos mesmos cenários.

Os resultados obtidos indicam que o MobETX superou o ETX em 5% na taxa de perda de pacotes em cenário com dispositivos móveis, com performance similar em redes com dispositivos estáticos. Estes resultados mostram que o MobETX pode ser uma alternativa promissora ao ETX, visto que além da melhora na perda de pacotes, mantém todas as características do ETX, sem a necessidade de alterações no protocolo de roteamento subjacente como, por exemplo, o RPL.

Futuramente, o MobETX necessitará de experimentos mais complexos de mobilidade como, por exemplo, cenários com múltiplos padrões de mobilidade simultâneos. Ademais, destaca-se validar o MobETX em cenários reais de *testbed* dado que sua implementação é compilável no ContikiOS. O MobETX pode ser incorporado com outros estimadores já existentes, a fim de otimizar outros fatores, aqui não abordados, como consumo energético da rede, latência, centralidade, entre outros.

Referências

- ALIZAI, M. H.; LANDSIEDEL, O.; WEHRLE, K. Exploiting the burstiness of intermediate-quality wireless links. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 8, n. 3, p. 826702, 2012. Citado na página 25.
- ALIZAI, M. H. et al. Efficient online estimation of bursty wireless links. In: IEEE. *2011 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*. [S.l.], 2011. p. 191–198. Citado na página 25.
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The internet of things: A survey. *Computer networks*, Elsevier, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010. Citado na página 16.
- BACCOUR, N. et al. Radio link quality estimation in wireless sensor networks: A survey. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, ACM, v. 8, n. 4, p. 34, 2012. Citado 8 vezes nas páginas 16, 17, 20, 21, 23, 24, 25 e 27.
- BACCOUR, N. et al. F-lqe: A fuzzy link quality estimator for wireless sensor networks. In: SPRINGER. *European Conference on Wireless Sensor Networks*. [S.l.], 2010. p. 240–255. Citado na página 27.
- BAHR, M.; WANG, J.; JIA, X. Routing in wireless mesh networks. *Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MOBICOM*, p. 1–15, 2006. Disponível em: <papers2://publication/uuid/2C6DCEDF-B08F-4DDE-9747-E3696283440F>. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 24.
- BAI, F.; SADAGOPAN, N.; HELMY, A. IMPORTANT: A framework to systematically analyze the Impact of Mobility on Performance of Routing protocols for Adhoc Networks. In: IEEE. *IEEE INFOCOM 2003. Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No. 03CH37428)*. [S.l.], 2003. v. 2, p. 825–835. Citado na página 30.
- BIAZ, S.; QI, B.; JI, Y. Improving expected transmission time metric in multi-rate multi-hop networks. In: IEEE. *2008 5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference*. [S.l.], 2008. p. 533–537. Citado na página 24.
- BOANO, C. A. et al. The triangle metric: Fast link quality estimation for mobile wireless sensor networks. In: IEEE. *2010 Proceedings of 19th International Conference on Computer Communications and Networks*. [S.l.], 2010. p. 1–7. Citado na página 27.
- CHARLES, A. J.; PALANISAMY, K. Neo-hybrid composite routing metric for rpl. *Procedia Computer Science*, Elsevier, v. 171, p. 1819–1828, 2020. Citado na página 26.
- COUTO, D. S. D. et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. *Wireless networks*, Springer-Verlag New York, Inc., v. 11, n. 4, p. 419–434, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 16, 19 e 24.

- DING, W.; TANG, L.; JI, S. Optimizing routing based on congestion control for wireless sensor networks. *Wireless Networks*, Springer, v. 22, n. 3, p. 915–925, 2016. Citado na página 27.
- DRAVES, R.; PADHYE, J.; ZILL, B. Comparison of routing metrics for static multi-hop wireless networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, ACM New York, NY, USA, v. 34, n. 4, p. 133–144, 2004. Citado na página 16.
- DUNKELS, A.; GRONVALL, B.; VOIGT, T. Contiki-a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors. In: IEEE. *29th annual IEEE international conference on local computer networks*. [S.l.], 2004. p. 455–462. Citado na página 34.
- FONSECA, R. et al. Four-bit wireless link estimation. In: *HotNets*. [S.l.: s.n.], 2007. Citado na página 25.
- GNAWALI, O.; LEVIS, P. The minimum rank with hysteresis objective function. *RFC 6719*, 2012. Citado na página 20.
- GUO, Z.-Q. et al. Fuzzy logic based multidimensional link quality estimation for multi-hop wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 13, n. 10, p. 3605–3615, 2013. Citado na página 23.
- INSTRUMENTS, T. CC2420 datasheet. *Reference SWRS041B*, 2007. Citado na página 16.
- JAYASRI, T.; HEMALATHA, M. Link quality estimation for adaptive data streaming in wsn. *Wireless Personal Communications*, Springer, v. 94, n. 3, p. 1543–1562, 2017. Citado na página 28.
- JOHANSSON, P. et al. Scenario-based performance analysis of routing protocols for mobile ad-hoc networks. In: ACM. *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*. [S.l.], 1999. p. 195–206. Citado na página 29.
- KASSAB, W.; DARABKH, K. A. A–z survey of internet of things: Architectures, protocols, applications, recent advances, future directions and recommendations. *Journal of Network and Computer Applications*, Elsevier, v. 163, p. 102663, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 32.
- LAI, D. et al. Measurement and characterization of link quality metrics in energy constrained wireless sensor networks. In: IEEE. *GLOBECOM'03. IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE Cat. No. 03CH37489)*. [S.l.], 2003. v. 1, p. 446–452. Citado na página 24.
- LAMAAZI, H.; BENAMAR, N. Rpl enhancement using a new objective function based on combined metrics. In: IEEE. *2017 13th international wireless communications and mobile computing conference (IWCMC)*. [S.l.], 2017. p. 1459–1464. Citado na página 25.
- LIU, D. et al. Frame counter: Achieving accurate and real-time link estimation in low power wireless sensor networks. In: IEEE. *2016 15th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*. [S.l.], 2016. p. 1–12. Citado na página 28.

- LIU, T.; CERPA, A. E. Data-driven link quality prediction using link features. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, ACM New York, NY, USA, v. 10, n. 2, p. 1–35, 2014. Citado na página 27.
- LIU, T.; CERPA, A. E. Temporal adaptive link quality prediction with online learning. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, ACM New York, NY, USA, v. 10, n. 3, p. 1–41, 2014. Citado na página 28.
- LOWRANCE, C. J.; LAUF, A. P. Link quality estimation in ad hoc and mesh networks: a survey and future directions. *Wireless Personal Communications*, Springer, v. 96, n. 1, p. 475–508, 2017. Citado na página 24.
- PEREIRA, H.; MORITZ, G. L.; FONSECA, M. Uma métrica de roteamento com eficiência energética para o rpl da internet das coisas. In: SBC. *Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. [S.l.], 2019. p. 224–237. Citado na página 27.
- PUCCINELLI, D.; HAENGGI, M. Duchy: Double cost field hybrid link estimation for low-power wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 5th Workshop on Embedded Networked Sensors (Hot EmNets' 08)*. [S.l.: s.n.], 2008. Citado na página 26.
- REN, F. et al. Traffic-aware dynamic routing to alleviate congestion in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, IEEE, v. 22, n. 9, p. 1585–1599, 2011. Citado na página 25.
- SANTOS, B. P. et al. Mobile matrix: routing under mobility in iot, iomt, and social iot. *Ad Hoc Networks*, Elsevier, v. 78, p. 84–98, 2018. Citado na página 16.
- SANTOS, B. P. et al. Internet das coisas: da teoria à prática. *Minicursos SBRC-Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, v. 31, 2016. Citado na página 16.
- SANTOS, B. P.; VIEIRA, L. F.; VIEIRA, M. A. Cgr: Centrality-based green routing for low-power and lossy networks. *Computer Networks*, Elsevier, v. 129, p. 117–128, 2017. Citado na página 16.
- SOBRAL, J. V. et al. Routing protocols for low power and lossy networks in internet of things applications. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, n. 9, p. 2144, 2019. Citado na página 18.
- SOUZA, F. R. et al. Mocha: Um framework para caracterização e comparação de traces de mobilidade. 2018. Citado na página 29.
- SUN, W. et al. Wnn-lqe: Wavelet-neural-network-based link quality estimation for smart grid wsns. *IEEE Access*, IEEE, v. 5, p. 12788–12797, 2017. Citado na página 22.
- TAN, W. L.; HU, P.; PORTMANN, M. Snr-based link quality estimation. In: IEEE. *2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. [S.l.], 2012. p. 1–5. Citado na página 22.
- THUBERT, P. et al. Objective function zero for the routing protocol for low-power and lossy networks (rpl). RFC 6552, March, 2012. Citado na página 19.

University of Osnabrück. *A Mobility Scenario Generation and Analysis Tool*. [S.l.], 2016. <<http://sys.cs.uos.de/bonnmotion/doc/README.pdf>>. Citado na página 29.

WOO, A.; CULLER, D. E. *Evaluation of efficient link reliability estimators for low-power wireless networks*. [S.l.]: Computer Science Division, University of California Oakland, Calif, USA, 2003. Citado na página 23.

XUE, X. et al. Rvfl-lqp: Rvfl-based link quality prediction of wireless sensor networks in smart grid. *IEEE Access*, IEEE, v. 8, p. 7829–7841, 2020. Citado na página 22.

ZHANG, H.; SANG, L.; ARORA, A. Comparison of data-driven link estimation methods in low-power wireless networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, IEEE, v. 9, n. 11, p. 1634–1648, 2010. Citado na página 25.

ZHENG, T. Trickle: A self-regulating algorithm for code propagation and maintenance in wireless sensor networks. *Listening*, v. 10, p. 8, 2004. Citado na página 19.