

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

HERMANO PEREIRA

MÉTRICA DE ROTEAMENTO PARA PROLONGAR O TEMPO DE
OPERAÇÃO DE REDES DE BAIXA POTÊNCIA E COM PERDAS

TESE

CURITIBA

2020

HERMANO PEREIRA

**MÉTRICA DE ROTEAMENTO PARA PROLONGAR O TEMPO DE
OPERAÇÃO DE REDES DE BAIXA POTÊNCIA E COM PERDAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como requisito à obtenção do título de “Doutor em Ciências”.
Área de Concentração: Telecomunicações e Redes.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Sergio Pereira
Fonseca
Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Luiz Moritz

CURITIBA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Pereira, Hermano

Métrica de roteamento para prolongar o tempo de operação de redes de baixa potência e com perdas [recurso eletrônico] / Hermano Pereira. -- 2020.
1 arquivo eletrônico (80 f.): PDF; 1,44 MB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Texto em português com resumo em inglês.

Tese (Doutorado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.
Área de Concentração: Telecomunicações e Redes. Linha de Pesquisa:
Comunicação e Processamento de Dados, Curitiba, 2020.

Bibliografia: f. 73-80.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Roteadores (Redes de computadores).
3. Métrica (Redes de computadores). 4. Sistemas de comunicação sem fio.
5. Internet das coisas. 6. Energia - Consumo. 7. Comutação por pacotes
(Transmissão de dados). 8. Confiabilidade (Engenharia). 9. Simulação
(Computadores). I. Fonseca, Mauro Sergio Pereira, orient. II. Moritz,
Guilherme Luiz, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.
IV. Título.

CDD: Ed. 23 -- 621.3

Biblioteca Central do Câmpus Curitiba - UTFPR
Bibliotecária: Luiza Aquemi Matsumoto CRB-9/794

TERMO DE APROVAÇÃO DE TESE

A Tese de Doutorado intitulada **Métrica de Roteamento para Prolongar o Tempo de Operação de Redes de Baixa Potência com Perdas**, defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Hermano Pereira**, no dia 27 de julho de 2020, foi julgada para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Área de concentração Telecomunicações e Redes, Linha de pesquisa Comunicação e Processamento de Dados, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Mauro Sérgio Pereira Fonseca – Presidente - UTFPR

Prof. Dr. Richard Demo Souza - UFSC

Prof. Dr. Marcelo Eduardo Pellenz – PUCPR

Profa. Dra. Anelise Munaretto Fonseca - UTFPR

Prof. Dr. Ohara Kerusauskas Rayel – UTFPR

Prof. Dr. Guilherme Luiz Moritz - UTFPR

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 27 de julho de 2020.

Carimbo e Assinatura do(a) Coordenador(a) do Programa

*Dedico aos meus pais,
Ivônio de Castro Pereira
e Zuelita Schindler.*

AGRADECIMENTOS

Sou grato ao Senhor Jesus Cristo, o Autor da minha vida.

Agradeço o apoio dos meus familiares. Minha querida esposa Giseli e enteado Lorenzo. Meus pais. Sogro Antonio e sogra Izold. Minha irmã Larissa e meu cunhado Miguel. Minha irmã Janaína, cunhado Matthias e sobrinho Davi. Cunhados Luiz Antonio e Tacianne. Minha tia Zilda e tio Denny.

Agradeço imensamente aos professores Mauro S. P. Fonseca e Guilherme L. Moritz pela dedicação e valiosa orientação. Agradeço aos professores Richard D. Souza e Anelise M. Fonseca pela contribuição nesta pesquisa. Agradeço ao professor Edgard Jamhour pelos direcionamentos iniciais. Agradeço também aos professores Marcelo E. Pellenz e Ohara K. Rayel pela participação na banca.

Sou grato aos colegas de trabalho da UTFPR Câmpus Guarapuava pelo incentivo, em especial aos professores do curso de Tecnologia em Sistemas para Internet que me apoiaram neste período. Também sou grato aos colegas André G. Lauer, Henrique F. O. Rodrigues e Maurício Barfknecht que me ajudaram e possibilitaram o uso dos laboratórios para eu realizar os experimentos desta pesquisa.

Agradeço também aos meus amigos que me incentivaram e celebraram os resultados: Diego Jardim, Jean L. Pierobom, José R. A. Junior, Josiel N. Kuk, Oeslei T. Ribas, Simey Rickli e William A. C. Castañeda.

Enfim, sou grato a todos que me acompanharam neste período.

Hermano Pereira
pereira (arroba) hermano.com.br

*"Existem coisas melhores adiante do que
qualquer outra que deixamos para trás."*

C.S. Lewis

RESUMO

PEREIRA, Hermano. **Métrica de Roteamento para Prolongar o Tempo de Operação de Redes de Baixa Potência e com Perdas**. 2020. 80 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

As Redes de Baixa Potência e com Perdas (LLNs, do inglês *Low-power and Lossy Networks*) ganharam destaque na comunidade científica devido ao paradigma tecnológico da *Internet* das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*). A Força-Tarefa de Engenharia da *Internet* (IETF, do inglês *Internet Engineering Task Force*) que dedica esforços em propor novos padrões para a *Internet*, se refere às LLNs como redes que se integram à *Internet*, ou seja, que constituem a IoT. O encaminhamento e a entrega de pacotes em LLNs representam um desafio em termos de confiabilidade e eficiência energética. Para tanto, um protocolo de roteamento foi projetado pela IETF: o Protocolo de Roteamento para Redes de Baixa Potência e com Perdas (RPL, do inglês *Routing Protocol for LLNs*). Visando estabelecer caminhos estáveis sobre enlaces com perdas, o RPL considera os custos obtidos de métricas para a tomada de decisão de roteamento. Dentre as quais, a Contagem de Transmissão Esperada (ETX, do inglês *Expected Transmission Count*) é a métrica mais empregada, em razão da confiabilidade. Porém, os nós intermediários (em que se formam os gargalos) ainda são prejudicados devido a rápida exaustão das baterias, motivando, assim, uma investigação mais aprofundada em eficiência de roteamento. Nesses termos, buscou-se neste trabalho aumentar o tempo de operação desses nós, partindo da hipótese de que o consumo estimado de energia da interface de rede, convertido para custo de métrica, poderia estender o tempo de vida das LLNs e aumentar a entrega de pacotes. Esses objetivos foram alcançados com diversos experimentos realizados em diferentes cenários simulados, que findaram em uma nova métrica de roteamento. Para tanto, este documento apresenta a Potência Média da Interface de Rede (NIAP, do inglês *Network Interface Average Power*), uma alternativa promissora à métrica ETX, que contribui para o balanceamento de carga, prolonga o tempo de operação dos nós intermediários e aumenta a taxa de entrega de pacotes em LLNs.

Palavras-chave: Métricas de Roteamento. Tempo de Vida da Rede. Balanceamento de Carga. Redes de Baixa Potência e com Perdas.

ABSTRACT

PEREIRA, Hermano. **Routing Metric to Extend the Lifetime of Low-Power and Lossy Networks**. 2020. 80 p. Thesis (Doctorate in Electrical Engineering and Industrial Informatics) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

Low-power and Lossy Networks (LLNs) have gained prominence in the scientific community due to the technological paradigm of the Internet of Things (IoT). The IETF (Internet Engineering Task Force) which dedicates efforts to propose new standards for the Internet, refers to LLNs as networks that integrate with the Internet, i.e., IoT. The routing and packet delivery in LLNs represent a challenge in terms of reliability and energy efficiency. Thus, a routing protocol was designed by the IETF: the RPL (Routing Protocol for LLNs). To establish stable paths across lossy links, RPL considers the costs obtained from metrics for routing decision making. Among these, ETX (Expected Transmission Count) is the most widely used, due to reliability. However, intermediate nodes (where bottlenecks arise) are still harmed due to the rapid exhaustion, thus prompting routing efficiency further investigation. In these terms, this work sought to increase the operation time of these nodes, based on the hypothesis that the estimated energy consumption of the network interface, converted to metric cost, could extend the lifetime of LLNs and increase the packet delivery. These objectives were achieved with several experiments performed in different simulated scenarios, which ended in a new routing metric. Therefore, this document presents the NIAP (Network Interface Average Power), a promising alternative to the ETX metric, which contributes to load balancing, extends the operation time of intermediate nodes, and increases the packet delivery ratio in LLNs.

Keywords: Routing Metrics. Network Lifetime. Load Balancing. Low-Power and Lossy Networks.

LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 1 – Temporizador para Atualização de Métrica	39
--	----

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Funcionamento do RPL	24
Figura 2 – Funcionamento de uma Função Objetivo	28
Figura 3 – Encaminhamento de Pacotes (NIAP vs ETX)	41
Figura 4 – Domínio de Colisão (NIAP vs ETX)	42
Figura 5 – Escolha de Caminho (NIAP vs ETX)	43
Figura 6 – Exemplo de uma Topologia Aleatória	49
Figura 7 – Uma Topologia para Experimentos Prévios	52
Figura 8 – Exaustão dos Nós Intermediários de uma Topologia	62
Gráfico 1 – Exaustão dos Nós Intermediários em Experimento Prévio	53
Gráfico 2 – Tempo de Vida da Rede com Diferentes Limiares	54
Gráfico 3 – Tempo de Vida da Rede com Diferentes Cargas	56
Gráfico 4 – Tempo de Vida da Rede com Diferentes Taxas de Recepção	57
Gráfico 5 – Tempo de Vida da Rede com Diferentes Intervalos de Envio	58
Gráfico 6 – Consumo de Energia dos Circuitos	60
Gráfico 7 – Tempo de Vida da Rede	62
Gráfico 8 – Percentual de Nós em Operação	63
Gráfico 9 – Consumo de Energia da Rede	64
Gráfico 10 – Total de Pacotes Entregues	65
Gráfico 11 – Taxa de Entrega de Pacotes	66
Gráfico 12 – Atraso Médio Fim-a-fim	67
Gráfico 13 – Média de Saltos	68
Gráfico 14 – Troca Média de Nós Pais	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre os Trabalhos Relacionados	35
Tabela 2 – Configuração do Ambiente de Simulação	46
Tabela 3 – Parâmetros do Consumo de Energia	47
Tabela 4 – Parâmetros do Cenário de Simulação	49
Tabela 5 – Consumo de Energia para Atualização de Métrica	59

LISTA DE SIGLAS

6LoWPAN	IPv6 sobre WPAN de Baixa Potência, do inglês IPv6 <i>over Low-power</i> WPAN
AMI	Infraestrutura Avançada de Medição, do inglês <i>Advanced Metering Infrastructure</i>
AODV	Protocolo de Vetor de Distância <i>Ad Hoc</i> sob Demanda, do inglês <i>Ad Hoc On-demand Distance Vector Routing</i>
BMRF	Encaminhamento RPL <i>Multicast</i> Bidirecional, do inglês <i>Bidirectional Multicast RPL Forwarding</i>
BRPL	RPL de Contrapressão, do inglês <i>Backpressure</i> RPL
CA-RPL	RPL com Prevenção de Congestionamentos, do inglês <i>Congestion Avoidance</i> RPL
CAOF	OF com Percepção de Contexto, do inglês <i>Context-Aware</i> OF
CARF	Métrica de Roteamento com Percepção de Contexto, do inglês <i>Context-Aware Routing Metric</i>
CLRPL	RPL com Balanceamento de Carga e Percepção de Contexto, do inglês <i>Context-Aware and Load-Balancing</i> RPL
CN	Nós Restritos, do inglês <i>Constrained Node</i>
CNC	Contagem de Nós Filhos, do inglês <i>Child Node Count</i>
CoAR	RPL com Percepção de Congestionamento, do inglês <i>Congestion-Aware</i> RPL
COOJA	Contiki OS Java
CPU	Unidade Central de Processamento, do inglês <i>Central Process Unit</i>
CSMA	Acesso Múltiplo com Detecção da Portadora, do inglês <i>Carrier Sense Multiple Access</i>
DAG	Grafo Acíclico Dirigido, do inglês <i>Directed Acyclic Graph</i>
DAO	Objeto de Anúncio do Destino, do inglês <i>Destination Advertisement Object</i>
DIO	Objeto de Informação DODAG, do inglês <i>DODAG Information Object</i>
DIS	Solicitação de Informação DODAG, do inglês <i>DODAG Information Solicitation</i>
DODAG	DAG Orientado ao Destino, do inglês <i>Destination Oriented</i> DAG

EC	Consumo de Energia, do inglês <i>Energy Consumption</i>
ECRM	Métrica de Roteamento com Percepção de Congestionamento e Energia, do inglês <i>Energy and Congestion-Aware Routing Metric</i>
EEM	Métrica de Estimativa de Energia, do inglês <i>Energy Estimation Metric</i>
EKF-MRPL	RPL com Percepção de Mobilidade e Filtro <i>Kalman</i> Estendido, do inglês <i>Extended Kalman Filter and Mobility aware RPL</i>
ELT	Tempo de Vida Esperado, do inglês <i>Expected Lifetime</i>
ENERGEST	Estimativa de Energia, do inglês <i>Energy Estimation</i>
ETX	Contagem de Transmissão Esperada, do inglês <i>Expected Transmission Count</i>
FDN	Primeira Morte de um Nó, do inglês <i>First Dead Node</i>
HC	Contagem de Saltos, do inglês <i>Hop-Count</i>
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, do inglês <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IETF	Força-Tarefa de Engenharia da <i>Internet</i> , do inglês <i>Internet Engineering Task Force</i>
IoT	<i>Internet</i> das Coisas, do inglês <i>Internet of Things</i>
IPv6	Protocolo da <i>Internet</i> versão 6, do inglês <i>Internet Protocol version 6</i>
ISM	Industrial, Científica e Médica, do inglês <i>Industrial, Scientific and Medical</i>
LBOF	OF com Carga Balanceada, do inglês <i>Load Balanced OF</i>
LC	Cor do Enlace, do inglês <i>Link Color</i>
LLN	Redes de Baixa Potência e com Perdas, do inglês <i>Low-power and Lossy Network</i>
LOADng	Próxima Geração do Protocolo Leve de Vetor de Distância <i>Ad Hoc</i> sob Demanda, do inglês <i>Lightweight On-Demand Ad hoc Distance-vector Next Generation</i>
LPM	Modo de Baixa Potência, do inglês <i>Low-Power Mode</i>
LQL	Nível de Qualidade do Enlace, do inglês <i>Link Quality Level</i>
MAC	Controle de Acesso ao Meio, do inglês <i>Media Access Control</i>
MANET	Redes Móveis <i>Ad Hoc</i> , do inglês <i>Mobile Ad Hoc NETWORK</i>

MOP	Modo de Operação, do inglês <i>Mode of Operation</i>
MP2P	Múltiplos Pontos para um Ponto, do inglês <i>Multipoint-to-Point</i>
MPL	Protocolo <i>Multicast</i> para LLNs, do inglês <i>Multicast Protocol for LLNs</i>
MRHOF	OF de Posicionamento Mínimo com Histerese, do inglês <i>Minimum Rank with Hysteresis OF</i>
NE	Energia do Nó, do inglês <i>Node Energy</i>
NIAP	Potência Média da Interface de Rede, do inglês <i>Network Interface Average Power</i>
NL-OF	OF de Comprimento Não Linear, do inglês <i>Non-Linear Length OF</i>
NSA	Atributo e Estado do Nó, do inglês <i>Node State and Attribute</i>
OF	Função Objetivo, do inglês <i>Objective Function</i>
OS	Sistema Operacional, do inglês <i>Operating System</i>
P2P	Ponto a Ponto, do inglês <i>Point-to-Point</i>
PDR	Taxa de Entrega de Pacotes, do inglês <i>Packet Delivery Ratio</i>
PLR	Taxa de Perda de Pacotes, do inglês <i>Packet Loss Ratio</i>
PRR	Taxa de Recepção de Pacotes, do inglês <i>Packet Reception Ratio</i>
PST	Limiar para Troca de Nós Pais, do inglês <i>Parent Switch Threshold</i>
PTR	Taxa de Transmissão de Pacotes, do inglês <i>Packet Transmission Rate</i>
QoS	Qualidade de Serviço, do inglês <i>Quality-of-Service</i>
QU	Utilização da Fila, do inglês <i>Queue Utilization</i>
RDC	Ciclo de Trabalho do Rádio, do inglês <i>Radio Duty Cycle</i>
RE	Energia Remanescente, do inglês <i>Remaining Energy</i>
RFC	Requisição para Comentários, do inglês <i>Request for Comments</i>
RFID	Identificação por Radiofrequência, do inglês <i>Radio-Frequency IDentification</i>

ROLL-WG	Grupo de Trabalho de Roteamento sobre LLNs, do inglês <i>Routing Over LLNs Working Group</i>
RPL	Protocolo de Roteamento para LLNs, do inglês <i>Routing Protocol for LLNs</i>
TAOF	OF com Percepção de Tráfego, do inglês <i>Traffic Aware OF</i>
TSCH	Multiplexação por Divisão de Tempo e Salto em Frequência, do inglês <i>Time Slotted Channel Hopping</i>
U-LLN	LLN Urbana, do inglês <i>Urban LLN</i>
UDGM	Mídia de Grafo de Disco Unitário, do inglês <i>Unit Disk Graph Medium</i>
UDP	Protocolo de Datagramas do Usuário, do inglês <i>User Datagram Protocol</i>
WPAN	Redes Pessoais Sem Fio, do inglês <i>Wireless Personal Area Network</i>
WSN	Redes de Sensores Sem Fio, do inglês <i>Wireless Sensors Network</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	MOTIVAÇÃO	20
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	Principal	21
1.2.2	Específicos	21
1.3	PUBLICAÇÕES	21
1.4	ESTRUTURA	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	REVISÃO DO RPL	23
2.1.1	Funcionamento	23
2.1.2	Temporização	25
2.1.3	Métricas de Roteamento	26
2.1.4	Funções Objetivo	27
2.1.5	Considerações	29
2.2	TRABALHOS RELACIONADOS	30
2.2.1	Avanços	30
2.2.2	Destaques	32
2.2.3	Base Comparativa	34
2.2.4	Considerações	35
3	PROPOSTA	37
3.1	CONSUMO ESTIMADO	37
3.2	MÉTRICA DE ROTEAMENTO	38
3.3	UNIDADE DE MEDIDA	38
3.4	ALGORITMO PARA ATUALIZAÇÃO	39
3.5	FUNÇÃO OBJETIVO	40
3.6	CONTRIBUIÇÃO	40
3.7	CONSIDERAÇÕES	44
4	EXPERIMENTOS	45
4.1	PARÂMETROS	45
4.1.1	Ambiente de Simulação	45
4.1.2	Energia Estimada	46
4.1.3	Configuração do RPL	47
4.1.4	Cenário de Simulação	48
4.1.5	Medidas de Desempenho	49
4.1.6	Considerações	51
4.2	PRÉVIAS	51
4.2.1	Balanceamento de Carga	51
4.2.2	Calibração de Limiares	54
4.2.3	Ajustes de Parâmetros	55
4.2.4	Análise de Código	58
4.2.5	Considerações	60
4.3	RESULTADOS	61

4.3.1	Eficiência Energética	61
4.3.2	Confiabilidade	65
4.3.3	Comunicação em Tempo Real	66
4.3.4	Estabilidade	68
4.3.5	Discussão	68
5	CONCLUSÃO	71
5.1	DIRECIONAMENTOS	71
	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

Há décadas a *Internet* está conectando computadores, permitindo a disseminação da informação e facilitando a comunicação entre as pessoas. Mas hoje, com a *Internet* das Coisas, os pequenos dispositivos ou coisas do cotidiano do ser humano também passaram a integrar a rede mundial (TAN; KOO, 2014).

O termo *Internet* das Coisas, do inglês *Internet of Things* (IoT), surgiu em 1999 quando Kevin Ashton considerou a ideia de que os Identificadores por Radiofrequência (RFIDs, do inglês *Radio-Frequency IDentifications*) poderiam ser acessados pela *Internet* para coletar e manipular informações obtidas diretamente do mundo real (ASHTON, 2009). Desde então a IoT passou a compor um importante nicho de mercado e emergiu como um tema de interesse acadêmico. Os sensores, os controles remotos, as lâmpadas e os eletrodomésticos são exemplos dessas coisas (*things*), que geralmente se comunicam por redes sem fio existentes, redes utilizadas em automação residencial, monitoração industrial, ambientes hospitalares, entre outras.

Essas redes, porém, tem pouca ou quase nenhuma conectividade com o Protocolo da *Internet* (IP, do inglês *Internet Protocol*). A Gartner Inc. estima que 25 bilhões de dispositivos estarão conectados à IoT até 2021 (OMALE, 2018), uma exigência de endereçamento no mínimo seis vezes maior do que foi disponibilizado na quarta versão do IP. Isso mostra a importância da implementação da pilha do Protocolo da *Internet* na sua sexta versão (IPv6, do inglês *Internet Protocol version 6*), a qual, além de permitir a comunicação com a *Internet*, também tem suporte para essa gama de endereços. Esse é um dos requisitos básicos listados por (PALATTELLA *et al.*, 2013), que são: i) suportar comunicação com baixo consumo de energia; ii) comunicação altamente confiável; e iii) comunicação compatível com a *Internet*.

Houve, assim, um crescente interesse dos pesquisadores pela IoT, dado que a aplicação desta nos diversos segmentos da sociedade trouxe novos desafios. Questões como padronização, segurança, confiabilidade e eficiência energética entraram em evidência. As Redes Pessoais Sem Fio (WPANs, do inglês *Wireless Personal Area Networks*) e as Redes de Sensores Sem Fio (WSNs, do inglês *Wireless Sensors Networks*), que compõem a IoT, requerem um endereço IP para que os seus dispositivos, ou pelo menos os seus roteadores de borda, possam se comunicar através da *Internet*. Para esse propósito, a Força-Tarefa de Engenharia da *Internet* (IETF, do inglês *Internet Engineering Task Force*), que denomina essas Redes de Baixa Potência e com Perdas (LLNs, do inglês *Low-power and Lossy Networks*), propôs na Requisição de Comentários

4919 (RFC, do inglês *Request for Comments*) uma adaptação do IP: o IPv6 sobre WPANs de Baixa Potência (6LoWPAN, do inglês *IPv6 over Low-power WPAN*) (KUSHALNAGAR *et al.*, 2007), visando a compressão e a fragmentação de pacotes para reduzir: a sobrecarga de pacotes, o consumo de banda, o processamento, e o consumo de energia. Desde então, os Nós Restritos (CNs, do inglês *Constrained Nodes*), que usualmente são alimentados por baterias, possuem pouca memória e baixo poder de processamento (BORMANN *et al.*, 2014), vieram a suportar o IPv6. Algoritmos simplificados, cabeçalhos com poucos bits, endereçamento resumido e fragmentação da carga útil, são requisitos para que novos protocolos possam vir a operar em nós restritos da IoT. Para tanto a IETF projetou um protocolo específico para o roteamento em LLNs compatível com a *Internet*. É o que descreve o documento RFC 6550 (WINTER *et al.*, 2012): a proposta de padrão de Protocolo de Roteamento para Redes de Baixa Potência e com Perdas (RPL, do inglês *Routing Protocol for LLNs*).

O RPL é um protocolo que configura uma topologia LLN em forma de grafo acíclico dirigido, ou seja, a partir de um nó raiz, os nós adjacentes se organizam virtualmente em formato de árvore para evitar laços de roteamento. A escolha pelo melhor caminho é auxiliada por métricas de roteamento, o documento RFC 6551 (VASSEUR *et al.*, 2012) especifica métricas dentre as quais ganha destaque a Contagem de Transmissão Esperada (ETX, do inglês *Expected Transmission Count*), comumente aplicada em LLNs. A métrica ETX colabora para formar caminhos confiáveis, mas a concentração do tráfego apenas por esses caminhos resulta em nós sobrecarregados e caminhos alternativos ociosos. Além disso, sem o balanceamento de carga adequado, faz com que as baterias dos nós intermediários se esgotem rapidamente (nós intermediários são aqueles que concentram a maior parte dos encaminhamentos da rede). Portanto, uma investigação se torna necessária, pois prolongar o tempo de operação desses nós representa entregar mais pacotes e estender o tempo de vida das LLNs.

Devido à necessidade de desonerar os nós intermediários, evitar caminhos com perdas e atender aos requisitos da IoT, esta pesquisa explorou os custos no envio de mensagens em termos energéticos, a fim de propor uma nova métrica de roteamento. Para tanto, este trabalho apresenta a Potência Média da Interface de Rede (NIAP, do inglês *Network Interface Average Power*), uma métrica baseada na potência média despendida pela interface de rede durante a transmissão de pacotes por dispositivos em LLNs. Durante os experimentos nesta pesquisa, observou-se que, explorando apenas o consumo estimado de energia da interface dos nós, foi possível evitar o encaminhamento de pacotes para nós sobrecarregados, bem como evitar caminhos sobre domínios

com maior probabilidade de colisão (as colisões aumentam o consumo de energia). Consequentemente, em comparação à métrica ETX, os resultados obtidos de simulações mostraram que a NIAP contribuiu para prolongar o tempo de vida das LLNs e ainda aumentar a taxa de entrega de pacotes. Por isso, este documento detalha a métrica proposta NIAP, demonstrando suas vantagens em relação à ETX, além de ter uma configuração simples e não exigir modificações na lógica de operação do padrão RPL.

1.1 MOTIVAÇÃO

O RPL permite configurar diferentes métricas para variadas aplicações (VASSEUR *et al.*, 2012) onde, por exemplo, é possível utilizar a métrica de latência se a aplicação exigir entrega de pacotes com baixo atraso. Porém, para qualquer métrica a ser utilizada é necessário antes implementar uma função objetivo (conforme RFC 6550), a qual é responsável por abstrair as informações para a decisão de encaminhamento sem a necessidade de tratar dos detalhes da comunicação e manutenção de roteamento. Até o momento desta pesquisa, a IETF havia proposto apenas oito métricas e duas funções objetivo para o RPL. Nota-se, no entanto, que a IETF não apresentou propostas para o balanceamento de carga que poderiam contribuir para a eficiência energética. Portanto, um assunto em aberto para ser explorado pela comunidade científica.

A métrica ETX foi concebida para a configuração de caminhos com alto rendimento através de redes sem fio em geral (COUTO *et al.*, 2003). Porém, as LLNs representam um desafio diferente, pois a ETX depende do tráfego constante (ou sondas) para calcular e convergir para caminhos confiáveis, já em contrapartida, as LLNs exigem a redução do tráfego devido às restrições de energia (VASSEUR, 2014). Logo, pode-se dizer que os pesquisadores possuem espaço para investigar e propor soluções alternativas para atender ao cenário particular das LLNs.

Além disso, os trabalhos na literatura que visam contribuir com melhorias para o RPL, buscam combinar duas ou mais métricas de roteamento, o que muitas vezes inclui a métrica ETX (LAMAASI; BENAMAR, 2020). Assim, a proposta de uma métrica simples que supere a métrica ETX em termos de confiabilidade e eficiência energética, pode, além de contribuir com o desempenho do RPL, substituir a métrica ETX nessas combinações e otimizar ainda mais o roteamento em LLNs.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Principal

Apresentar a NIAP como uma métrica alternativa à ETX para melhorar o desempenho do roteamento em Redes de Baixa Potência e com Perdas (LLNs), ou seja, para otimizar recursos com o RPL.

1.2.2 Específicos

- Realizar o levantamento da literatura e apresentar a contribuição da métrica proposta como uma nova métrica simples;
- Detalhar o ambiente de experimentos e a configuração das métricas de comparação;
- Avaliar a métrica proposta no que se refere à eficiência energética, confiabilidade, comunicação em tempo real e estabilidade.

1.3 PUBLICAÇÕES

- (PEREIRA *et al.*, 2019) *Uma Métrica de Roteamento com Eficiência Energética para o RPL da Internet das Coisas*. **Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 37, p. 224–237, 2019. ISSN 2177-9384.
- (PEREIRA *et al.*, 2020) *Increased Network Lifetime and Load Balancing based on Network Interface Average Power Metric for RPL*. **IEEE Access**, vol. 8, pp. 48686–48696, 2020. ISSN 2169-3536.

No artigo (PEREIRA *et al.*, 2019), publicado em simpósio nacional, apresentou-se uma prévia da métrica proposta, antes nomeada de Métrica de Estimativa de Energia (EEM, do inglês *Energy Estimation Metric*). Nesse trabalho a métrica foi experimentada em uma topologia LLN similar à descrita no documento RFC 6687. Mesmo sem um mecanismo para economizar energia durante as atualizações de métrica, foi possível mostrar que a métrica proposta poderia aumentar o tempo de vida das LLNs. Na sequência, em revista internacional, no artigo (PEREIRA *et*

al., 2020), publicou-se a métrica proposta (NIAP) completa, com resultados significativos em relação ao tempo de vida das LLNs, balanceamento de carga e taxa de entrega de pacotes.

1.4 ESTRUTURA

Uma revisão bibliográfica sobre o RPL e os trabalhos relacionados são apresentados no Capítulo 2. A métrica proposta é apresentada no Capítulo 3. O Capítulo 4, por sua vez, discorre sobre as ferramentas e os parâmetros utilizados, sobre os experimentos prévios e apresenta uma análise dos resultados dos experimentos comparativos. Por fim, o Capítulo 5 apresenta a conclusão e os direcionamentos para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este Capítulo foi dividido em duas Seções, a investigação sobre o RPL na literatura e os trabalhos relacionados. Detalhamento do roteamento em LLNs com a métrica ETX estão na Seção 2.1, na revisão do RPL. Os avanços no roteamento em LLNs, os trabalhos em destaque e as métricas selecionadas para a base de comparação estão na Seção 2.2.

2.1 REVISÃO DO RPL

O RPL foi projetado para atender aos requisitos de roteamento descritos nos seguintes documentos: 1) RFC 5548 (DOHLER *et al.*, 2009) para Redes Urbanas (U-LLNs, do inglês *Urban LLNs*); 2) RFC 5673 (PISTER *et al.*, 2009) para Redes Industriais (do inglês *Industrial LLNs*); 3) RFC 5826 (BRANDT *et al.*, 2010) para Automação Residencial (do inglês *Home Automation*), e 4) RFC 5867 (MARTOCCI *et al.*, 2010) para Automação Predial (do inglês *Build Automation*). Para tanto, o Grupo de Trabalho de Roteamento sobre LLNs (ROLL-WG, do inglês *Routing Over Low-power and Lossy Networks—Working Group*) empregou esforço para confeccionar o documento RFC 6550 (WINTER *et al.*, 2012), o qual descreve o RPL como proposta de padrão para o roteamento em LLNs. Esta Seção apresenta uma revisão do RPL: funcionamento, temporização, métricas de roteamento e funções objetivo.

2.1.1 Funcionamento

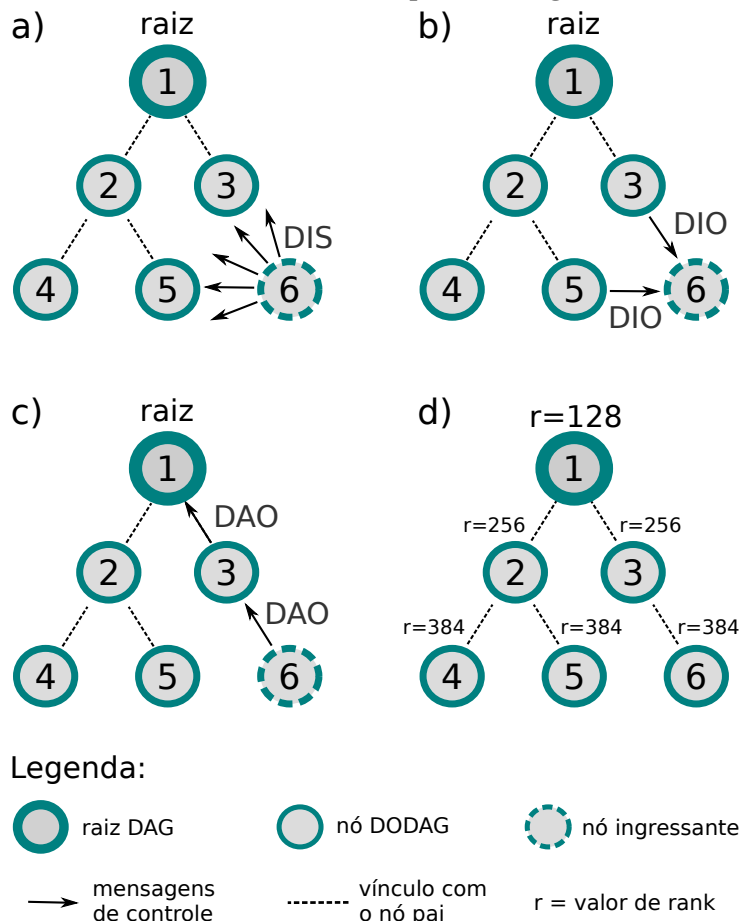
O RPL tem por objetivo formar um Grafo Acíclico Dirigido (DAG, do inglês *Directed Acyclic Graph*) sobre uma topologia LLN e estabelecer o melhor caminho entre os nós com um ou mais nós raiz. Para uma topologia LLN em que há apenas um nó raiz, o RPL irá formar um DAG Orientado ao Destino (DODAG, do inglês *Destination Oriented DAG*). Para construir e manter um DODAG, o RPL faz o uso de três mensagens de controle (ilustração na Figura 1):

- A mensagem Solicitação de Informação DODAG (DIS, do inglês *DODAG Information Solicitation*): é a primeira a ser enviada aos nós vizinhos quando um nó pretende ingressar em um DODAG, solicitando assim informações de roteamento;
- A mensagem Objeto de Informação DODAG (DIO, do inglês *DODAG Information Object*): é a que carrega as informações necessárias para que o nó ingressante possa tomar decisões

de roteamento;

- A mensagem Objeto de Anúncio do Destino (DAO, do inglês *Destination Advertisement Object*), que é encaminhada no sentido ascendente (*upward*), do nó ingressante para o nó pai (ou nó raiz), com a finalidade de informar que fez a escolha do nó pai e que agora compõe o DODAG. Também há a mensagem de Confirmação DAO (DAO-Ack, do inglês *DAO Acknowledgment*) que no sentido descendente (*downward*) pode ser utilizada como uma confirmação do nó raiz para o nó ingressante.

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



Fonte: Autoria própria.

Para construir um DODAG, o nó raiz é o primeiro a enviar mensagens DIO em respostas às mensagens DIS na topologia. Uma vez que os nós vizinhos ao nó raiz decidem qual será o nó pai, confirmando através de mensagens DAO, esses também poderão enviar mensagens DIO para

os seus nós vizinhos, estendendo assim o DODAG. Em detalhes, cada nó que deseja ingressar na topologia deverá difundir mensagens DIS, conforme ilustra-se com o nó 6 na Figura 1a. Na sequência, os nós que já estão no DODAG devem responder com mensagens DIO, assim retrata a Figura 1b. Uma vez que o nó ingressante possui informações suficientes de seus nós vizinhos, este escolhe o nó pai preferido (*preferred parent*) com o auxílio das métricas e restrições de roteamento. O novo nó, então, calcula o seu próprio valor de posicionamento (*rank*) e confirma a operação com uma mensagem DAO para o nó pai escolhido, o qual poderá encaminhá-la para alcançar o nó raiz (no caso de operar o modo de não armazenamento de rotas), assim ilustra a Figura 1c. Por fim, o novo nó passa a integrar o DODAG e a fornecer mensagens DIO aos seus nós vizinhos contendo o valor de *rank* e dados de roteamento.

O valor de *rank* do nó raiz (*root*) é o menor da topologia, e à medida que os nós ingressam no DODAG esse valor é incrementado a fim de evitar laços de roteamento. A ilustração na Figura 1d mostra o nó raiz com valor de *rank* igual a 128, e o valor mínimo de incremento de 128 a cada salto (parâmetro denominado de *MinHopRankInc*, em inglês *minimum hop rank increase*), visto a diferença obtida dos nós adjacentes. Nessa ilustração, o nó 5 incrementou 128 ao valor de *rank* recebido do nó pai, nó 2, que resultou em 384 como o seu próprio valor de *rank*. Esses valores são apenas exemplos, pois o cálculo do valor de *rank* está condicionado à função objetivo que está sendo utilizada.

2.1.2 Temporização

Após a convergência de uma topologia RPL, ou seja, quando todos os nós que integram o DODAG possuem um caminho até o nó raiz, esses mesmos nós irão periodicamente fazer a troca de mensagens DIO para manter a topologia de roteamento estável. É nessa situação que o algoritmo de pingo (*trickle*), descrito em RFC 6206 (LEVIS *et al.*, 2011), inicia a sua operação. Por se tratar de um algoritmo que leva em conta a eficiência energética, incrementa-se, então, o intervalo de tempo para a troca de mensagens DIO para reduzir o processamento de mensagens de controle. Porém, qualquer mudança no caminho de roteamento, devido às reparações ou às inconsistências, farão com que os nós envolvidos reiniciem os seus temporizadores.

2.1.3 Métricas de Roteamento

As métricas de roteamento são utilizadas pelos protocolos de roteamento para computar os melhores caminhos (WINTER *et al.*, 2012). Antes de enviar um pacote, o nó consulta a sua tabela de roteamento para encontrar a melhor rota que alcançará a rede do destinatário. A cada opção de rota, há um custo de caminho já calculado em que uma métrica de roteamento foi aplicada. Assim, a cada salto, ou a cada enlace, a métrica pode indicar informações de latência, ou taxa de transferência, por exemplo, e calcular esse custo ao longo do caminho. O documento RFC 6551 (VASSEUR *et al.*, 2012), que lista e classifica métricas utilizadas pelo RPL, descreve como esses custos podem ser utilizados: o valor máximo, o valor mínimo, a soma de todos os valores ao longo do caminho ou, até mesmo, a multiplicação ao invés da soma. Esse documento também descreve como esses valores podem ser reportados e carregados pela topologia, ou seja, descreve como funcionam os recipientes de métrica DAG (em inglês *DAG metric containers*), as quais são preenchidas e acrescentadas às mensagens DIO ou mensagens DAO. Desta maneira as métricas podem ser gravadas (anexadas) ou agregadas no decorrer do caminho que se está construindo. Estas são as métricas descritas em RFC:

- Métricas baseadas em informações dos nós:
 - Estado e Atributo do Nó (NSA, do inglês *Node State and Attribute*): utilizado para informar o estado do nó, como por exemplo, se este está sobrecarregado;
 - Energia do Nó (NE, do inglês *Node Energy*): para identificar a fonte de energia do nó (bateria, coleta ou convencional) e carregar a informação sobre a carga de energia remanescente;
 - Contagem de Saltos (HC, do inglês *Hop-Count*): para informar a quantidade de saltos do nó local para alcançar o nó raiz.
- Métricas baseadas em informações de enlaces:
 - Taxa de Transferência (*Throughput*): utilizada para informar a capacidade do enlace em bytes por segundo;
 - Latência (*Latency*): para informar o atraso sobre um enlace medido em microssegundos;

- Nível de Qualidade do Enlace (LQL, do inglês *Link Quality Level*): para classificar a qualidade do enlace em oito níveis, da alta para baixa, dada uma escala;
- Contagem de Transmissão Esperada (ETX): informar a probabilidade de um pacote chegar com sucesso ao nó vizinho em um dado enlace;
- Cor do Enlace (LC, do inglês *Link Color*): para identificar os enlaces de maneira customizada, como exemplo, diferenciar enlaces cifrados de enlaces abertos.

Dentre essas métricas, destaca-se a ETX (agregada por soma), que conforme RFC 6550 é a mais comum a ser empregada em LLNs, posto que, geralmente as LLNs são redes sem fio e a métrica ETX contribui para maximizar a taxa de transferência nessas redes. De acordo com os autores (COUTO *et al.*, 2003), calcula-se

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

em que df , entrega encaminhada (*delivery-forwarded*) é a probabilidade de um pacote ser entregue com sucesso para o nó vizinho, e dr , entrega recebida (*delivery-received*), é a probabilidade de um pacote de confirmação do nó vizinho ser recebido com sucesso.

2.1.4 Funções Objetivo

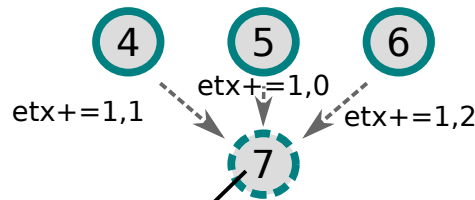
O documento RFC 6550 define o funcionamento do RPL e o documento RFC 6551 define as métricas de roteamento. As regras necessárias para integrar o RPL e as métricas de roteamento são estabelecidas pelas funções objetivo (OFs, do inglês *Objective Functions*). Uma OF é responsável por tratar das informações das métricas recebidas por um nó, tomar a decisão pelo melhor caminho de roteamento até o nó raiz (selecionar o nó pai preferido), e calcular o próprio valor de *rank*.

A Figura 2 é um exemplo ilustrativo de como um nó ingressante no DODAG (neste caso o nó 7) recebe as informações de roteamento para selecionar o nó pai preferido. Primeiramente os nós pais candidatos (nós 4, 5 e 6) irão encapsular a métrica ETX (métrica de exemplo), agregada por soma desde o nó raiz, em mensagens DIO que serão enviadas aos nós vizinhos. Uma vez que o nó 7 recebe essas mensagens, este poderá incrementar o valor de ETX conforme o custo dos enlaces, totalizando: 3,85, 3,5 e 3,45 consoante com os nós 4, 5 e 6, respectivamente. Assim, utilizando a OF, o nó 7 fará a comparação entre os valores de ETX até encontrar o nó candidato que possui o caminho com o menor custo até o nó raiz. O nó 6, então, será selecionado como o

nó pai preferido. Por fim, o nó 7 calculará o próprio valor de *rank*, 384 do nó pai somado com 128 (*MinHopRankInc*), que resultará em 512.

Figura 2 – Ilustração de um nó recebendo mensagens DIO com informações da métrica ETX e selecionando o nó pai preferido de acordo com a função objetivo.

rank=384 rank=384 rank=384
 etx=2,75 etx=2,5 etx=2,25



Função Objetivo:
 nó pai=menor etx([4,5,6])
 rank+=128

Resultado:

~~nó[4] = 3,85~~

~~nó[5] = 3,50~~

nó[6] = 3,45 (nó pai escolhido)

Legenda:



Fonte: Autoria própria.

A implementação do RPL em um nó roteador, conforme RFC 6550, deve suportar no mínimo uma função objetivo sem métrica. Para isso, o documento RFC 6552 (THUBERT, 2012) descreve a função objetivo zero (OF0, do inglês *Objective Function Zero*). A OF0 considera os valores de *rank* de maneira análoga à métrica de contagem de saltos. Assim, o valor 256 de *MinHopRankInc* é utilizado para incrementar o valor de *rank* a cada salto.

A Função Objetivo de Posicionamento Mínimo com Histerese (MRHOF, do inglês *Minimum Rank with Hysteresis Objective Function*), descrita em RFC 6719 (GNAWALI; LEVIS, 2012), é uma OF melhor elaborada que apresenta dois mecanismos de tomada de decisão: 1) selecionar o nó pai com o menor caminho até o nó raiz, ou seja, o caminho com um *rank* mínimo; e 2) fazer a troca de nó pai somente quando a diferença entre dois caminhos extrapolar um limiar (*threshold*), esse mecanismo é chamado de histerese. De acordo com a descrição em RFC, a MRHOF pode fazer o uso de uma das três métricas: contagem de saltos, latência ou ETX, as quais tem seu custo acumulado ao longo do caminho de roteamento. A Figura 2 é uma ilustração

similar ao funcionamento da MRHOF, mas neste caso seria necessário incluir a condição

$$pp_{new} = \begin{cases} cn, & \text{se } (cn < pp - pst), \\ pp, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (2)$$

em que o novo nó pai preferido pp_{new} (*new preferred parent*) é aquele que tem o menor custo para alcançar o nó raiz. Assim, se o nó vizinho candidato a nó pai cn (*candidate neighbor*) oferecer um caminho ainda menor que um dado limiar de diferença pst (*parent switch threshold*), então este será o nó pai preferido, senão o nó pai atual pp (*preferred parent*) será mantido. Desta maneira a histerese faz com que a troca de nó pai seja evitada quando o custo para um novo caminho é pouco significativo, o que resulta em estabilidade na topologia de roteamento.

A OF0 não faz o uso do recipiente de métrica DAG (Subseção 2.1.3), mas a MRHOF necessita deste para repassar informações sobre as métricas de roteamento. Porém, o documento RFC 6719 recomenda a composição do valor de *rank* com a métrica ETX, o que dispensa o uso de recipientes e reduz o tamanho das mensagens DIO, colaborando com a eficiência energética.

2.1.5 Considerações

Combinar o RPL com a métrica ETX (MRHOF) é o esquema mais recomendado a ser aplicado em LLNs. Experimentos conforme RFC 6687 (TRIPATHI *et al.*, 2012) mostram que o RPL, configurado com a ETX, é uma solução ideal para LLNs de larga escala. Até mesmo em redes similares, como é o caso de redes de Infraestrutura Avançada de Medição (AMI, do inglês *Advanced Metering Infrastructure*), em que o documento RFC 8036 (CAM-WINGET *et al.*, 2017) se refere à aplicação da métrica ETX junto ao RPL para calcular os custos dos caminhos. Além disso, o RPL também é uma solução de roteamento com eficiência energética para a *Internet das Coisas* — RFC 8352 (GOMEZ *et al.*, 2018). Encontram-se na literatura muitos trabalhos que usam essa combinação como base de comparação, visto a sua aplicação com bons resultados e, claro, por se tratar de uma proposta de padrão para a *Internet*. No entanto, há uma abertura para pesquisas que objetivem avanços no que se trata de balanceamento de carga, confiabilidade e eficiência energética em LLNs. Nesse contexto, este trabalho propõe uma nova métrica para contribuir nesses quesitos.

2.2 TRABALHOS RELACIONADOS

Na literatura está acessível uma vasta gama de trabalhos que propõem melhorias para o RPL: modificações no padrão, novas métricas de roteamento e novas funções objetivo. Os autores de três levantamentos recentes realizaram um esforço para coletar e classificar esses trabalhos, os quais são: (SOBRAL *et al.*, 2019), (LIM, 2019) e (LAMAAZI; BENAMAR, 2020). Nesta Seção, com base nesses estudos, apresentam-se os avanços no roteamento em LLNs, bem como os trabalhos em destaque que foram publicados recentemente em importantes periódicos da área. Na sequência, apresentam-se também as métricas de roteamento que foram selecionadas para formar a base comparativa desta pesquisa.

2.2.1 Avanços

O RPL é um protocolo de roteamento proativo, ou seja, é um protocolo que configura caminhos antes que sejam requisitados. Em contrapartida, um protocolo de roteamento reativo estabelece caminhos apenas no momento em que há necessidade de utilizá-los, um exemplo é a Próxima Geração do protocolo Leve de vetor de Distância *Ad hoc* sob Demanda (LOADng, do inglês *Lightweight On-demand Ad hoc Distance-vector—Next Generation*). O RPL foi inicialmente projetado para o fluxo de pacotes dos nós folhas para o nó raiz, Múltiplos Pontos para um Ponto (MP2P, do inglês *Multipoint-to-Point*), em razão do seu algoritmo para formar DAGs. No entanto, o RPL apresenta deficiências na comunicação de nó sensor para nó sensor, Ponto-a-Ponto (P2P, do inglês *Point-to-Point*) (YI *et al.*, 2013). Apesar do LOADng se apresentar como uma alternativa para o roteamento P2P em LLNs, o RPL avançou nesse assunto, o documento RFC 6997 (GOYAL *et al.*, 2013) especifica um mecanismo de descobertas de caminhos para comunicação P2P. Apesar de não haver um documento RFC que especifique o LOADng, a IETF possui um rascunho para a aplicação deste no roteamento em Redes Móveis *Ad Hoc* (MANETs, do inglês *Mobile Ad Hoc NETWORKS*) (CLAUSEN *et al.*, 2016). Conforme listado por (SOBRAL *et al.*, 2019), as pesquisas prosseguem em soluções P2P para LLNs, como é o trabalho (ANAMALAMUDI *et al.*, 2019) que apresenta o protocolo de Vetor de Distância *Ad Hoc* sob Demanda (AODV, do inglês *Ad Hoc On-demand Distance Vector*) baseado no RPL.

Com o RPL se estabelecendo como o padrão de roteamento em LLNs, muitas pesquisas foram motivadas na busca de melhorias, propondo modificações. O Encaminhamento BMRP (*Multicast Bidirecional*, do inglês *Bidirectional Multicast RPL Forwarding*) (LORENTE *et al.*,

2017) é um exemplo de otimização que buscou melhorar o RPL para o encaminhamento de mensagens em *multicast*, a própria IETF também está tratando desse tema com o documento RFC 7731 (HUI; KELSEY, 2016), que descreve o Protocolo de *Multicast* para Redes de Baixa Potência e com Perdas (MPL, do inglês *Multicast Protocol for LLNs*). Para melhorar o roteamento descendente (*downward*), a solução DualMOP-RPL (KO *et al.*, 2015) é uma proposta que modifica o RPL combinando os Modos de Operação (MOP, do inglês *Mode of Operation*), ou seja, o armazenamento de rotas (*storing mode*) com o roteamento pela origem, descrito em RFC 6554 (CULLER *et al.*, 2012). Outro exemplo de melhoria está em permitir o roteamento por vários nós pais, como é o caso implementado por (ZHU *et al.*, 2017), visto que o documento RFC 6550 não especifica mecanismos para balanceamento de carga. Inclusive, inexitem especificações em RFC para evitar congestionamentos em LLNs, melhoria que foi proposta por (TANG *et al.*, 2016): o RPL com Prevenção de Congestionamentos (CA-RPL, do inglês *Congestion Avoidance RPL*). Dentre as muitas melhorias propostas na literatura, também é importante destacar a dificuldade de aplicar o RPL em LLNs com mobilidade dos nós, um exemplo de melhoria nesse sentido é o EKF-MRPL (BOUAZIZ *et al.*, 2019), o Filtro de *Kalman* Estendido (do inglês *Extended Kalman Filter*) com suporte à Mobilidade para o RPL.

De acordo com o documento RFC 6550 é possível adicionar ao RPL as diferentes métricas e funções objetivo. Novas pesquisas buscam melhorias com esse intuito, propor novas métricas e OFs sem modificar o protocolo. Há vantagens nisso, pois manter a operação padrão do RPL facilita a sua implementação em diferentes sistemas e dispositivos. O trabalho de (ARAUJO *et al.*, 2018) é um exemplo, uma proposta de quatro OFs com lógica *fuzzy* que combina três métricas para obter a Qualidade de Serviço (QoS, do inglês *Quality-of-Service*) em LLNs. A OF de Comprimento Não-Linear (NL-OF, do inglês *Non-Linear Length OF*) é uma proposta de OF que aceita uma quantidade arbitrária de métricas visando atender aos requisitos de aplicações de comunicação em tempo real (KHALLEF *et al.*, 2017). Uma solução para balanceamento de carga está no trabalho de (JI *et al.*, 2018), que apresenta uma nova OF com Percepção de Tráfego (TAOF, do inglês *Traffic Aware OF*) com uma nova métrica de roteamento de Taxa de Transmissão de Pacotes (PTR, do inglês *Packet Transmission Rate*). Por fim, mais um exemplo é a métrica apresentada por (DUQUENNOY *et al.*, 2017), uma variação da ETX como parte da solução de roteamento descendente (*downward*) confiável para LLNs.

2.2.2 Destaques

A métrica *Sigma*-ETX (SANMARTIN *et al.*, 2018) é baseada no desvio padrão da métrica ETX ao longo de um caminho de roteamento. Trata-se de uma métrica simples com roteamento por apenas um nó pai, ou seja, requisito básico para operar com o RPL. Em simulações com topologias de 20, 40, 50 e 100 nós, a *Sigma*-ETX superou a *Per-Hop* ETX (XIAO *et al.*, 2014), a MRHOF/ETX e a OF0. Considerando os resultados coletados a partir do 15º salto, a MRHOF alcançou 57,69% da taxa de entrega de pacotes obtida com a *Sigma*-ETX e, na topologia com 100 nós, a MRHOF alcançou 77,08% do tempo de vida de rede obtido com a *Sigma*-ETX.

O trabalho de (TAGHIZADEH *et al.*, 2018) buscou solucionar a perda de pacotes e o esgotamento de energia quando há tráfego elevado em LLNs. O artigo apresenta uma OF de Percepção de Contexto (CAOF, do inglês *Context-Aware OF*) e uma Métrica de Roteamento de Percepção de Contexto (CARF, do inglês *Context-Aware Routing Metric*). A CAOF calcula o valor de *rank* considerando o contexto de cada nó, e a métrica CARF é composta pela métrica de Energia Remanescente (RE, do inglês *Remaining Energy*), Utilização da Fila (QU, do inglês *Queue Utilization*), e Percepção de Contexto (*Context-Awareness*). Em experimentos comparativos com o RPL (MRHOF/ETX), o RPL de Percepção de Contexto e Balanceamento de Carga (CLRPL, do inglês *Context-Aware and Load-Balancing RPL*) foi implementado em topologias com até 100 nós. Nas maiores topologias o RPL obteve uma taxa de perda de pacotes de até 32% enquanto o CLRPL teve perdas abaixo de 15%. Além disso, os resultados desse trabalho mostram que o CLRPL prolongou o tempo de vida das LLNs em 10% a 20% quando comparado ao RPL em determinados fluxos de pacotes. O CLRPL é classificado como uma abordagem recente que trata especificamente de tráfegos em LLNs (SOBRAL *et al.*, 2019) como uma solução de métrica composta (LAMA AZI; BENAMAR, 2020).

O trabalho de (BHANDARI *et al.*, 2018) apresentou o RPL de Percepção de Congestionamento (CoAR, do inglês *Congestion-Aware RPL*) para o controle de congestionamento e o balanceamento de carga em LLNs. Esse protocolo considera as métricas ETX, QU e RE. Para classificar e selecionar os nós pais, utiliza-se um esquema próprio de detecção adaptativa de congestionamento. O CoAR foi comparado com o RPL (MRHOF/ETX) e com a Métrica de Roteamento de Percepção de Congestionamento e Energia (ECRM, do inglês *Energy and Congestion-Aware Routing Metric*) (ULLAH *et al.*, 2017) em simulações com topologias aleatórias de 16 a 41 nós. Na topologia de 16 nós o CoAR consumiu metade da energia que foi

consumida com o RPL. Para os diferentes tamanhos de redes, o CoAR obteve uma taxa de entrega de pacotes até 48,7% maior que o RPL. O CoAR é uma solução de métrica composta conforme (LAMA AZI; BENAMAR, 2020) e, também, classificado por (LIM, 2019) como uma solução para evitar congestionamentos em LLNs.

O artigo (LAMA AZI; BENAMAR, 2018) apresenta a OF-EC, uma proposta de OF que faz combinação de métricas utilizando lógica *fuzzy*. As métricas ETX, HC e de Consumo de Energia (EC, do inglês *Energy Consumption*) são combinadas para auxiliar na tomada de decisão. Em experimentos, a OF superou a OF-*Fuzzy* (KAMGUEU *et al.*, 2015), a ENTOT (DEMICHELI, 2012) e a OF-ETX em topologias densas de 10 a 50 nós. Em termos de taxa de entrega de pacotes a OF-EC superou a OF-ETX em até 10%. Em termos do tempo total de vida das LLNs a OF-EC alcançou resultado 35% maior do que o obtido com a OF-ETX. A OF-EC é uma solução de função objetivo recente que implementa lógica *fuzzy* conforme a classificação de (LAMA AZI; BENAMAR, 2020).

O trabalho de (TAHIR *et al.*, 2018) apresenta o RPL de Contrapressão (BRPL, do inglês *Backpressure RPL*) para melhorar a taxa de transferência e adaptabilidade em LLNs dinâmicas. Essa solução combina uma OF com um mecanismo de roteamento que controla congestionamentos. Além disso, apresenta algoritmos para tratar de carga de dados variáveis no tempo e a mobilidade dos nós. Em um ambiente real de 100 nós, o BRPL superou o RPL (ETX) com 4,5 vezes menos perdas de pacotes. Em um ambiente simulado com 130 nós, o BRPL superou o RPL em diferentes condições de tráfegos, chegando à uma perda de pacotes 20 vezes menor. O BRPL é uma solução que implementa roteamento por múltiplos nós pais, previne congestionamentos e realiza balanceamento de carga (LIM, 2019), com suporte à mobilidade dos nós (SOBRAL *et al.*, 2019).

Esses são trabalhos recentes que superaram o RPL (MRHOF/ETX) quanto à confiabilidade, eficiência energética e balanceamento de carga. Além disso, com exceção do CLRPL, a ETX foi utilizada como parte de suas soluções de maneira modificada ou combinada com outras métricas.

As soluções *Sigma*-ETX e OF-EC não exigem modificação do RPL em sua operação padrão. A métrica *Sigma*-ETX pode ser integrada ao RPL como uma métrica simples e a OF-EC se integra como uma função objetivo. Porém, as soluções CLRPL, CoAR e BRPL são melhor elaboradas e necessitam de adaptação ou modificação do RPL para atingirem seus objetivos. Modificar o RPL pode melhorar resultados e atender a cenários específicos das LLNs, mas

podem onerar o desempenho dos nós, aumentar a complexidade e, principalmente, resultar em incompatibilidade com outros nós RPL existentes no mercado.

Além do mais, com exceção da OF-EC, as demais soluções apresentaram melhorias quando testadas em cenários particulares. A métrica *Sigma*-ETX apresentou melhores resultados em nós distantes ao nó raiz em relação à quantidade de saltos. O CLRPL superou o RPL mas em cenários de LLNs com tráfego intenso de pacotes. O CoAR e o BRPL tem sua melhor operação em LLNs que apresentam congestionamento, o BRPL inclusive em redes com mobilidade dos nós. O RPL foi projetado para LLNs que geralmente são redes de sensores sem fio, com pouca ou nenhuma mobilidade, com rádios de baixa potência e a entrega de pequenas quantidades de dados. Todavia essas soluções precisam de melhor investigação com as LLNs convencionais, visto que incrementar a implementação do RPL e aumentar a sua complexidade pode ser de pouca serventia quando a maioria das LLNs se encaixam em um cenário comum que é bem atendido pelo RPL padrão.

Por fim, nota-se que há particularidades nessas soluções que estão além de uma métrica simples para o roteamento em LLNs, como se propõe neste trabalho. Para tanto, na Subseção 2.2.3 justifica-se a busca e a escolha realizada por outro trabalho para formar a base de comparação nesta pesquisa.

2.2.3 Base Comparativa

Para formar uma base comparativa, buscou-se na literatura por trabalhos relacionados que pudessem ser implementados e comparados à proposta desta pesquisa. A métrica de base mais comum encontrada em LLNs é a ETX, usualmente configurada na forma RPL com MRHOF. Não obstante, esta também é aplicada neste trabalho. Para incrementar a base comparativa, buscou-se entre os trabalhos aqui destacados uma solução para realizar uma comparação justa com a métrica proposta. Ao investigar as opções, notou-se que a métrica *Sigma*-ETX impõe uma sobrecarga de protocolo (*overhead*) em comparação ao uso da métrica ETX somente, visto que centraliza as mensagens DAO no nó raiz para calcular o desvio padrão para então, depois, propagar os custos de caminhos via mensagens DIO. Além disso, a *Sigma*-ETX foi testada em LLNs simuladas sem perdas no meio físico, o que não condiz com a realidade dessas redes. A CLRPL, por sua vez, é uma solução desenhada para um cenário particular em que LLNs dinâmicas possuem um tráfego intenso de pacotes, ou seja, o CLRPL é o RPL adaptado para melhor desempenhar nesses cenários específicos. Os demais trabalhos (CoAR, OF-EC e BRPL),

no entanto, são soluções complexas e melhor elaboradas que utilizaram a métrica ETX como parte de suas métricas combinadas. Considerando que a proposta desta pesquisa é uma alternativa para a métrica ETX, essas soluções serão melhores como opções para futuros testes.

Ao buscar por uma nova métrica para a base comparativa, foi encontrado o trabalho de (JI *et al.*, 2018), que além da sua publicação em simpósio internacional, também foi publicado como uma proposta de nova função objetivo em documento rascunho para a IETF (KOUTSI-AMANIS *et al.*, 2019). Os resultados dos experimentos sobre uma topologia limitada de 12 nós, mostraram que a TAOF/PTR superou a OF de Carga Balanceada (LBOF, do inglês *Load Balanced OF*) (QASEM *et al.*, 2016), a MRHOF/ETX e a OF0 em eficiência energética e taxa de entrega de pacotes. Em experimentos prévios nesta pesquisa, a TAOF/PTR alcançou resultados significativos em relação à MRHOF/ETX, uma solução competitiva que foi escolhida e utilizada durante os experimentos comparativos que estão descritos neste documento.

A Tabela 1 resume os trabalhos listados nesta Seção: se estes modificaram o padrão RPL (segunda coluna), se realizaram o encaminhamento por mais de um nó pai (terceira coluna) e, ainda, se são soluções de métrica simples ou de métricas combinadas (quarta coluna).

Tabela 1 – Diferenças entre os trabalhos relacionados e a métrica proposta.

Trabalhos	Modificação do RPL	Nós Pais	Métrica de Roteamento
NIAP	Não	Único	Simple
ETX	Não	Único	Simple
<i>Sigma-ETX</i>	Não	Único	Simple
PTR	Não	Único	Simple
CLRPL	Sim	Único	Combinada
CoAR	Sim	Único	Combinada
OF-EC	Não	Único	Combinada
BRPL	Sim	Múltiplos	Combinada

Observação: em destaque as métricas selecionadas para a base comparativa.

Fonte: Autoria própria.

2.2.4 Considerações

Nota-se que a comunidade científica apresentou muitos avanços para o RPL com soluções que vão além de métricas e funções objetivo. No entanto, esta pesquisa focou na contribuição de uma nova métrica de roteamento simples e de fácil implementação, a NIAP. Para compor uma base de comparação, buscou-se nos trabalhos relacionados outras métricas que pudessem se equiparar com a métrica proposta. De acordo com a Tabela 1 é possível observar que

as métricas *Sigma*-ETX e PTR se apresentaram como as melhores candidatas. Em experimentos prévios, a implementação da métrica *Sigma*-ETX não resultou conforme descrição em seu artigo, porém a métrica PTR possuía detalhes suficientes que possibilitaram a sua implementação. Assim, a base comparativa desta pesquisa foi formada pelas métricas NIAP, ETX e PTR.

3 PROPOSTA

Este Capítulo apresenta a proposta de uma nova métrica de roteamento: a potência média da interface de rede (NIAP). Inicialmente, nesta pesquisa, foi testada a métrica de Energia do Nó (NE, do inglês *Node Energy*) (VASSEUR *et al.*, 2012), visto que as pesquisas na comunidade científica conduziam para a revisão de protocolos, algoritmos e métricas de roteamento para atender ao novo e particular cenário das LLNs. A métrica NE colaborou para a construção de caminhos de economia de energia, porém, sem analisar a confiabilidade e o balanceamento de carga. No entanto, foi identificado que a operação da interface de rede de um nó poderia ser mensurada como energia despendida e colaborar também com esses outros quesitos. Assim, nesse contexto, atentou-se para o manuseio de dados de potência de rádio e do consumo de energia para a contribuição de uma nova métrica. Todavia, os nós que compõem as LLNs possuem restrições (BORMANN *et al.*, 2014), e coletar tais informações poderiam onerar esses nós e não alcançar os resultados esperados. Para tanto, a primeira Seção deste Capítulo descreve a solução de (DUNKELS *et al.*, 2007): de como estimar esse consumo via mecanismos de *software*. As Seções seguintes apresentam os detalhes da proposta: a métrica de roteamento, um algoritmo para atualização, uma variação de função objetivo e uma explicação da contribuição.

3.1 CONSUMO ESTIMADO

A monitoração da disponibilidade de energia em dispositivos alimentados por bateria é de suma importância para a projeção de WSNs, pois essa informação pode contribuir para que protocolos e aplicações venham a obter eficiência energética e prolongar o tempo de operação dessas redes. Um modo de obter tal informação se dá por mecanismos de monitoração via *hardware*. Porém, as plataformas recentes para as WSNs não dispõem de mecanismos para mensurar energia, visto que são propositalmente desenhadas em tamanho reduzido para atender a um produto de baixo custo. Assim, adicionar a implementação da monitoração por *hardware* se mostra custosa e complexa. Alternativamente, no trabalho (DUNKELS *et al.*, 2007), apresenta-se uma solução via *software* que, com algumas modificações no código-fonte do sistema embarcado, viabiliza estimar a exaustão de energia do nó ao contabilizar o tempo dispensado na utilização do microprocessador e da interface de rede. Com base no tempo gasto em determinados circuitos,

calcula-se a energia total consumida (E)

$$E = V(I_m t_m + I_l t_l + I_{tx} t_{tx} + I_{rx} t_{rx} + \sum_i I_{c_i} t_{c_i}), \quad (3)$$

em que V é a tensão da bateria, I_x , $x \in \{m, l, tx, rx, c_i\}$ são as correntes exigidas da fonte de alimentação para: a execução do microprocessador, a manutenção do Modo de Baixa Potência (LPM, do inglês *Low-Power Mode*), a transmissão de pacotes, escuta e recepção de pacotes, e suporte aos variados circuitos respectivamente, enquanto t_x , $x \in \{m, l, tx, rx, c_i\}$ é o tempo gasto em cada um dos estados mencionados.

3.2 MÉTRICA DE ROTEAMENTO

A NIAP é uma métrica de roteamento baseada no consumo médio estimado de energia da interface de rede, calcula-se

$$NIAP = \frac{E_{iface}}{T}, \quad (4)$$

em que E_{iface} é o consumo total de energia da interface de rede,

$$E_{iface} = V(I_{tx} t_{tx} + I_{rx} t_{rx}), \quad (5)$$

e T é um intervalo de tempo específico para o monitoramento. Assim, a NIAP é a potência média da interface de rede (*Network Interface Average Power*).

3.3 UNIDADE DE MEDIDA

Como unidade de medida, recomenda-se o uso em milijoules por minuto (mJ/min) para o custo de métrica NIAP. Estes são os motivos:

- 1) Em milijoules porque o consumo de energia da interface de rede em dispositivos de LLNs, que normalmente opera com o padrão IEEE 802.15.4 (IEEE, 2015), é significativamente reduzido em comparação às tecnologias de redes sem fio convencionais. Esse consumo reduzido pode ser conferido na documentação (*datasheet*) de diversos dispositivos produzidos para esse tipo de rede, por exemplo: Nordic Semiconductor (NORDIC, 2020), NXP Semiconductors (NXP, 2020) e Texas Instruments (TEXAS, 2020a) (TEXAS, 2020c);
- 2) Em minutos porque, apesar do joule já ser uma unidade de medida que inclui o tempo, é necessário considerar o tempo de rádio inativo no modo de dormência (*sleeping*) do

mecanismo de ciclo de trabalho (RDC, do inglês *Radio Duty Cycle*), o qual é comum em dispositivos para LLNs que são alimentados por bateria (DUNKELS, 2011).

3.4 ALGORITMO PARA ATUALIZAÇÃO

A atualização periódica da métrica NIAP em pequenos intervalos de tempo incrementaria o consumo de energia devido ao aumento no uso de processamento. Por outro lado, se a atualização da métrica fosse efetuada apenas no momento em que se prepara as mensagens DIO, então o intervalo de tempo T em (4) necessitaria de arredondamento e impactaria na precisão da métrica. Por essa razão, o Algoritmo 1 foi desenvolvido para controlar o tempo de atualização da métrica junto à atualização do tempo de envio de mensagens DIO, este conforme o intervalo de tempo obtido com o algoritmo de pingo (*trickle*).

Algoritmo 1 – Temporizador para Atualização de Métrica

```

1: enquanto Verdadeiro faça
2:   Aguardar(Intervalo_de_Tempo);
3:   se (Proxima_Propagacao_DIO_Foi_Modificada) e
     (Proxima_Propagacao_DIO < (Agora() + Intervalo_de_Tempo)) então
4:     Atualizar_Métrica_NIAP(); { Atualizar conforme (4). }
5:     Próxima_Propagacao_DIO_Foi_Modificada := Falso;
6:   fim se
7: fim enquanto

```

Fonte: Autoria própria.

Após a convergência do RPL, de tempos em tempos cada nó irá propagar mensagens DIO para os nós vizinhos visando manter a estabilidade da topologia de roteamento. Porém, isso não ocorre de maneira uniforme, antes esse tempo de propagação é ajustado em consonância com o algoritmo de pingo. Para tanto, uma variável do tipo *boolean* é alocada para detectar se houve esse ajuste. Em paralelo, com um laço de repetição, o Algoritmo 1 verifica se essa variável foi modificada e, ainda, se logo haverá uma propagação de mensagens DIO dado um determinado intervalo de tempo. Confirmadas essas informações, a métrica então será atualizada conforme (4). Esta solução permite que a métrica NIAP seja atualizada um pouco antes da preparação das mensagens DIO e, conseqüentemente, reduz a quantidade de atualizações e melhora a precisão da métrica.

3.5 FUNÇÃO OBJETIVO

A NIAP-OF é uma função objetivo para atender à métrica NIAP. Para que haja rápida convergência, o limiar de histerese deve ser configurado com o valor um pouco maior que o intervalo de tempo utilizado no algoritmo de atualização de métrica ($pst > interval + \delta$), estipula-se δ para incrementar esse intervalo. Essa configuração faz com que ocorra uma convergência rápida para os caminhos com baixo consumo de energia. Assim que o nó pai preferido é selecionado, a NIAP-OF faz o cálculo do novo valor de $rank$

$$Rank_{new} = Rank_{base} + Rank_{inc} + NIAP_{normal}, \quad (6)$$

em que o valor de $rank$ de base ($Rank_{base}$) é informado pelo nó pai preferido. No caso do nó raiz, o valor de $Rank_{base}$ poderá ser estipulado, mas deverá ser o menor valor da topologia. Já o valor de incremento ($Rank_{inc}$) é adicionado a cada salto para evitar que se construam laços de roteamento. Na sequência, o custo da métrica NIAP pode ser ajustada de acordo com uma escala empírica para diferentes tipos de rádio e estabelecer valores limites a serem tratados pela OF, assim o custo da NIAP normalizada ($NIAP_{normal}$) é somada ao novo valor de $rank$.

Por fim, é necessário que o nó divulgue o seu valor de $rank$ para os nós vizinhos via mensagens DIO. O custo da métrica NIAP pode ser divulgado em separado em recipientes DAG (adicionando um novo objeto de métrica na mensagem DIO) ou, para reduzir o tamanho das mensagens, pode-se combinar ao valor $rank$ conforme já mostrado em (6).

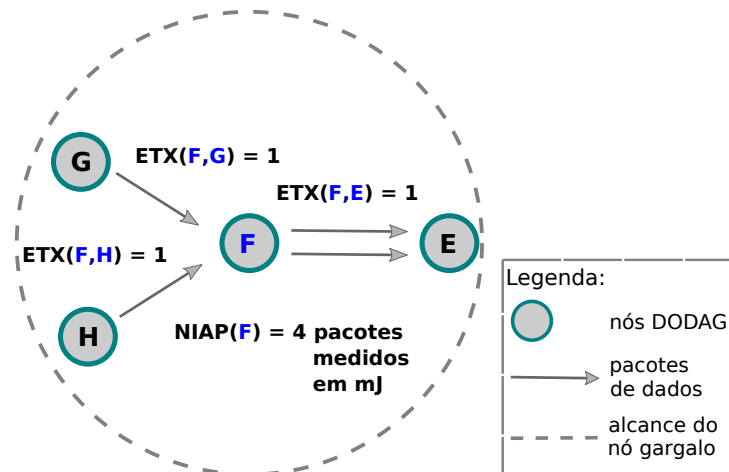
3.6 CONTRIBUIÇÃO

Métricas de roteamento com base no consumo de energia são comuns na literatura. Dentre as pioneiras a serem aplicadas em LLNs, encontra-se a métrica de energia remanescente de (KAMGUEU *et al.*, 2013), uma implementação da métrica de energia dos nós que, em experimentos, resultou apenas na extensão do tempo de vida de uma topologia. Em outro exemplo, o Tempo de Vida Esperado (ELT, do inglês *Expected Lifetime*) é uma métrica composta que explora o consumo de energia da interface para incluir a potência de transmissão de pacotes. Esta foi apresentada no trabalho de (IOVA *et al.*, 2015) e recebeu destaque elevado na literatura, visto os resultados significativos que foram obtidos em relação à MRHOF, pois trata-se de uma métrica composta que faz parte de uma solução de roteamento por múltiplos nós pais. Entretanto, após investigação nesta pesquisa, foi identificado que a potência média estimada da interface de

rede serviria como uma nova métrica, pois a mesma poderia indicar a existência de caminhos com sobrecarga de roteamento e nós intermediários em domínios com alta probabilidade de colisão. Todavia, no que se buscou em trabalhos relacionados, esta ainda não havia sido explorada como uma métrica simples. Para melhor exemplificar esta contribuição, esta Seção apresenta e discute três exemplos de caso de uso.

A Figura 3 ilustra os nós G e H enviando pacotes para o nó roteador F, o qual faz o encaminhamento para o nó E que fará encaminhamentos para alcançar o nó raiz, isso como parte de uma topologia ainda maior. A métrica ETX irá calcular apenas o custo de confiabilidade dos enlaces, o qual será modificado apenas se houverem perdas. A NIAP, no entanto, leva em conta a quantidade de pacotes encaminhados ao contabilizar a energia dispensada para enviar e receber pacotes. Na ilustração, a NIAP do nó F, que é medida em milijoules (mJ), contribui para encontrar os nós intermediários que formam gargalos, ou melhor, para identificar a sobrecarga de roteamento em LLNs.

Figura 3 – Encaminhamento de pacotes pelo nó F e o custo da métrica ETX versus NIAP. A métrica ETX não contabiliza encaminhamentos. A métrica NIAP, por sua vez, contabiliza a energia utilizada para pacotes encaminhados, o que ajuda na identificação de nós intermediários que formam gargalos.

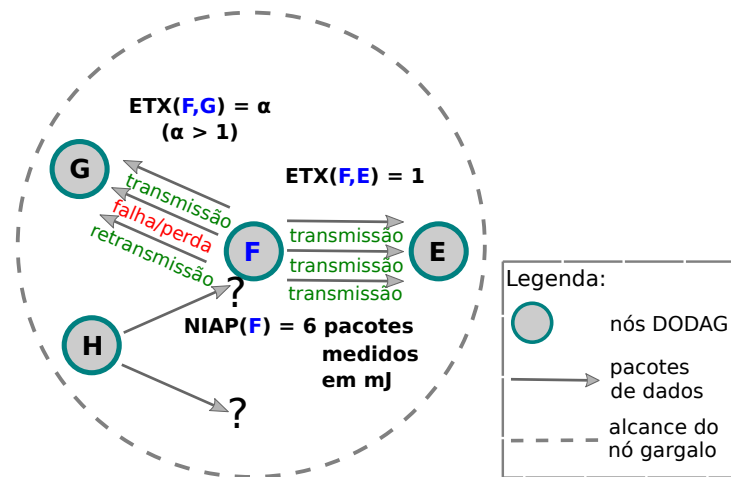


Fonte: Autoria própria.

A ilustração na Figura 4 mostra o custo das métricas quando o nó F tenta enviar pacotes para os nós E e G dentro de um domínio de colisão. As retransmissões são realizadas pelo protocolo de acesso quando ocorrem colisões no meio físico. A métrica ETX mantém a confiabilidade do enlace quando as (re)transmissões terminam com sucesso. No caso de perdas/falhas mesmo em retransmissões, daí então a ETX incrementará o seu custo, é o que ilustra o enlace entre os nós F e G. A métrica NIAP, por sua vez, irá contabilizar a energia

dispensada para todos os pacotes enviados, tanto os que obtiveram sucesso como os que falharam. Na sequência, quando o nó H tenta ingressar ou reconfigurar as suas rotas, receberá o custo de métrica do nó F. Se a métrica ETX for empregada, o custo entre os nós F e E será fornecido para o nó H, ignorando a informação de colisão entre os nós F e G. A NIAP, no entanto, contabilizou a informação de colisão em milijoules para informar o nó H, contribuindo assim para encontrar e evitar caminhos em que há uma alta probabilidade de ocorrer colisões.

Figura 4 – Retransmissão de pacotes pelo nó F após a ocorrência de colisões. A métrica ETX reduz a confiabilidade do enlace. A métrica NIAP, no entanto, contabiliza a energia dispensada com todos os pacotes, o que auxilia na identificação de domínios de colisão.

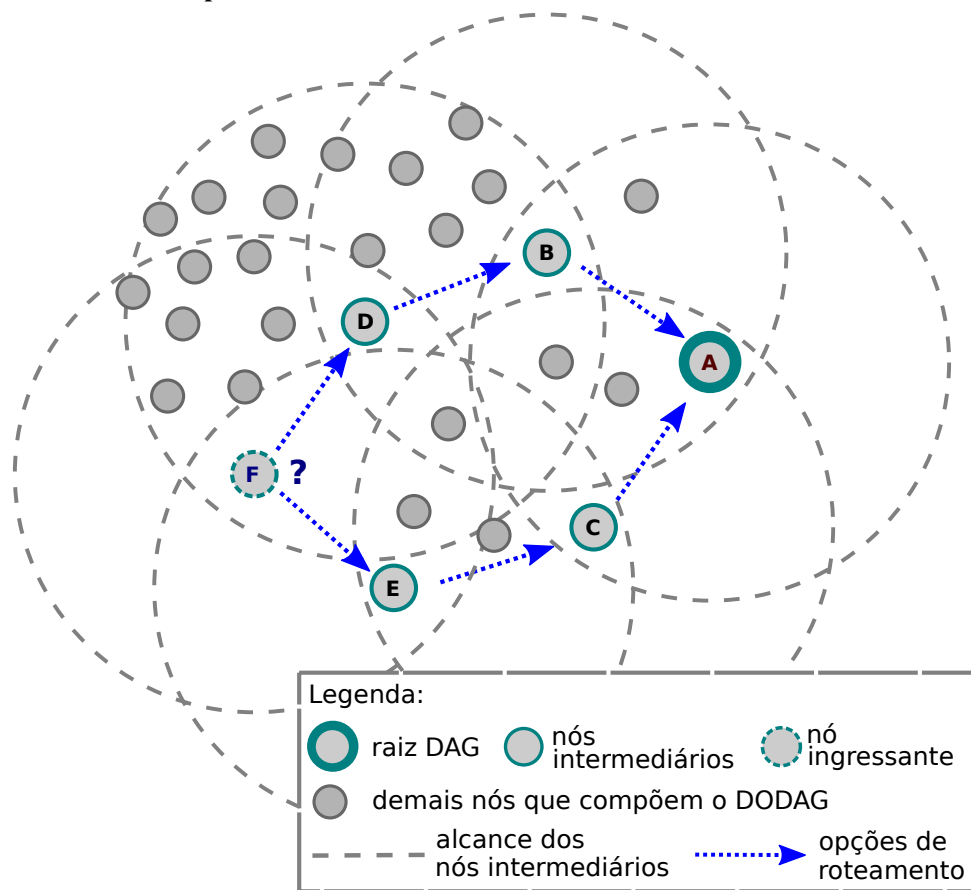


Fonte: Autoria própria.

Por fim, o exemplo na Figura 5 ilustra a escolha de caminho por um nó ingressante (nó F) em um DODAG. Esta topologia é composta pelo nó raiz A, os nós intermediários B, C, D, e E, e os demais nós folhas que formam os domínios de colisão. Por um caminho, os nós B e D se encontram nos maiores domínios de colisão, são 12 e 22 nós em concorrência, respectivamente. Já o outro caminho é formado pelos nós C e E, com 7 e 5 nós em concorrência, respectivamente. Certamente, o caminho com a maior probabilidade de perder pacotes em decorrência de colisões é o caminho via D-B-A. No que se trata de encaminhamento de pacotes, o nó B será o roteador de 18 a 24 nós e o nó C será o roteador de 2 a 8 nós. Assim, o roteamento de pacotes para alcançar o nó intermediário B representará a maior sobrecarga da topologia. Todavia, o caminho E-C-A se mostra como o ideal para o ingresso do nó F. No que se trata da métrica ETX, esta necessita do tráfego de pacotes, ou ao menos de pacotes sondas (*probes*), para estabelecer o custo de confiabilidade de um enlace, em contraste com o projeto das LLNs que busca reduzir a transmissão de pacotes visando a economia de energia. Assim, tanto a métrica ETX como a

métrica NIAP precisam convergir seus custos na medida em que ocorre o tráfego de pacotes, e nesse cenário a NIAP se sobressai. Isso ocorre porque no momento inicial da convergência do RPL ainda não há perdas suficientes para a métrica ETX determinar a confiabilidade de cada enlace, então se o melhor caminho escolhido inicialmente foi via D-B-A, então o nó F irá selecionar o caminho E-C-A após um certo tempo de operação da rede. Tempo este reduzido quando se utiliza a métrica NIAP, visto que todos os pacotes, enviados, recebidos e encaminhados são contabilizados em forma de energia (em milijoules), antecipando e precisando a escolha do melhor caminho via E-C-A.

Figura 5 – O ingresso do nó F em um DODAG com duas opções para alcançar o nó A, o raiz. A métrica NIAP rapidamente identificará a sobrecarga de roteamento e os maiores domínios de colisão via D-B-A e permitirá ao nó F selecionar o caminho E-C-A. A métrica ETX também identificará o mesmo caminho, entretanto, após contabilizar perdas devido às sobrecargas e colisões suficientes para alterar o seu custo de métrica.



Fonte: Autoria própria.

3.7 CONSIDERAÇÕES

A ETX é uma métrica de qualidade do enlace, em que os caminhos são formados por enlaces em que há a menor probabilidade de perdas. Evitar perdas também evita retransmissões, o que conseqüentemente também reduz o consumo de energia, mas caminhos confiáveis criam gargalos e, apesar da confiabilidade, nós intermediários tendem a consumir mais energia e reduzir o tempo de vida das LLNs. A NIAP é uma métrica baseada nas informações do nó, em que a energia despendida pela rede auxilia na construção de caminhos com o menor consumo energético. Assim como a ETX, a métrica NIAP aqui proposta pode aumentar a confiabilidade na entrega de pacotes em LLNs, mas além disso a NIAP pode prolongar o tempo de operação dos nós intermediários. Para validar essas afirmações, foi necessário os ensaios comparativos entre as métricas em questão.

4 EXPERIMENTOS

Este Capítulo descreve como esta pesquisa buscou validar a métrica proposta. Os parâmetros e o ferramental utilizado para os experimentos (materiais e métodos) estão descritos na Seção 4.1. Os experimentos prévios para testes e ajustes são apresentados na Seção 4.2. Por fim, os resultados numéricos obtidos nesta pesquisa são detalhados e representados graficamente na Seção 4.3.

4.1 PARÂMETROS

Os dispositivos para a IoT ainda são novidades no mercado, e preparar uma LLN para testar novas soluções pode exigir a implementação de muitos nós e encarecer a pesquisa. Para tanto, o levantamento feito por (LAMA AZI; BENAMAR, 2020) mostra que a maioria dos trabalhos científicos são testados em ambiente simulado e que, antes mesmo de serem testados em um ambiente real, publicam seus resultados. Esse levantamento também mostra que a maior parte das topologias foram configuradas com dezenas de nós, sem mobilidade e distribuição aleatória. Além disso, a taxa de entrega de pacotes e a eficiência energética são as duas medidas mais aplicadas para o comparativo de desempenho entre as soluções. O simulador COOJA (Contiki OS Java) aparece como ferramenta preferencial para a realização de experimentos com o RPL, o levantamento de (KIM *et al.*, 2017) reportava 63% dos trabalhos, agora (LAMA AZI; BENAMAR, 2020) reporta que 81% dos trabalhos utilizaram esse simulador. Da mesma maneira, nesta pesquisa, as métricas de comparação (NIAP, ETX e PTR) foram implementadas e configuradas com o simulador COOJA, buscou-se a similaridade com os trabalhos relacionados nesse quesito. Nas Subseções seguintes detalha-se: o ambiente e o cenário de simulação, os parâmetros utilizados para estimar energia, a configuração do RPL, bem como as medidas de desempenho para avaliar os resultados dos experimentos comparativos.

4.1.1 Ambiente de Simulação

Para esta pesquisa foi utilizado o simulador COOJA, o qual faz parte do pacote do sistema operacional embarcado para a IoT: Contiki versão 2.7 (CONTIKI, 2020). Foi utilizado o modelo de propagação de rádio por Mídia de Grafo de Disco Unitário (UDGM, do inglês

Unit Disk Graph Medium), em que cada nó foi visualizado como o centro de um disco e só pôde se comunicar com os nós que estavam ao seu alcance, inclusive os nós envolvidos na mesma zona de interferência de outro estavam sujeitos às perdas por ocorrência de colisões. Para a simulação de *hardware* foi selecionada a opção de plataforma TMoteSky (MEMSIC, 2020). O protocolo de Acesso Múltiplo com Detecção de Portadora (CSMA, do inglês *Carrier Sense Multiple Access*), conforme o padrão IEEE 802.15.4 (IEEE, 2015), foi o responsável pelo controle de acesso ao meio, em que os nós compartilharam o canal 26, banda ISM, frequência 2,4 GHz e taxa de transferência de 250 Kbps. Para o ciclo de trabalho do nó, que desativa o rádio quando está ocioso, foi configurado o ContikiMAC (DUNKELS, 2011), uma implementação do ciclo de trabalho do rádio (RDC) própria do sistema Contiki. O RDC foi desativado apenas para o nó raiz, por se tratar de um roteador de borda com alimentação de energia contínua. A pilha de protocolos IPv6 foi utilizada: encapsulamento em 6LoWPAN e encaminhamento RPL com armazenamento de rotas. Por fim, o Protocolo de Datagramas do Usuário (UDP, do inglês *User Datagram Protocol*) foi usado para encapsular dados de mensagens fim-a-fim. A Tabela 2 resume a configuração deste ambiente.

Tabela 2 – Configuração do ambiente de simulação.

Simulador	COOJA
Modelo de Propagação	UDGM
Plataforma	TMoteSky
Sistema Operacional	Contiki 2.7
Controle de Acesso ao Meio	IEEE 802.15.4 CSMA Canal 26 (2,4 GHz)
Ciclo de trabalho	ContikiMAC (exceto o nó raiz)
Camada de Rede	6LoWPAN RPL (modo armazenamento)
Fim-a-fim	UDP

Fonte: Autoria própria.

4.1.2 Energia Estimada

Para simular a exaustão de energia em nós operados a bateria foi utilizado o módulo ENERGEST disponível no sistema embarcado Contiki. A Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados no cálculo dessa energia estimada (3). Os parâmetros de CPU e LPM foram extraídos conforme o microcontrolador MSP430 (TEXAS, 2020b) e os parâmetros de TX e RX foram

extraídos da documentação do *chip* de rádio CC2420 (TEXAS, 2020a). Para completar essa equação também foram consideradas duas baterias alcalinas Energizer (IEC-LR6/ANSI-15A) (ENERGIZER, 2020) de 1,5 volts ($V = 3$), porém, simuladas com carga inicial reduzida.

Tabela 3 – Parâmetros para estimar o consumo de energia para a exaustão de bateria dos nós.

Circuito	Parâmetros	Notas
CPU	$I_m = 330 \text{ uA}$	25°C, 1 MHz, 32768
LPM	$I_l = 2 \text{ uA}$	25°C, 32768 Hz, LPM3
TX	$I_{tx} = 17,4 \text{ mA}$	0 dBm
RX	$I_{rx} = 18,8 \text{ mA}$	-

Fonte: Parâmetros extraídos de (TEXAS, 2020a) e (TEXAS, 2020b).

4.1.3 Configuração do RPL

Para a configuração do RPL foram considerados os valores originais da versão 2.7 do sistema Contiki. Poucos ajustes foram necessários:

- O espaço em memória (*buffer*) para o processamento de pacotes ficou limitado ao máximo de 16 pacotes para o nó raiz e o máximo de oito pacotes para os demais nós, dada a limitação de memória da plataforma utilizada;
- Uma atualização do temporizador de *watchdog_periodic* foi incluída na estrutura de repetição que percorre a tabela de nós vizinhos, para evitar as reinicializações de sistema devido ao tempo de processamento dispensado nesse procedimento.

As métricas ETX, PTR e NIAP foram configuradas como se segue:

- Para os experimentos em que se utilizou a métrica ETX, manteve-se a MRHOF conforme o sistema Contiki, que buscou atender ao que descreve o documento RFC 6719.
- A configuração da combinação TAOF/PTR foi obtida de experimentos prévios: 1) uma janela de três minutos para estabelecer uma taxa de tráfego de pacotes; 2) o limiar de quatro pacotes por minuto para histerese; 3) a limitação de 128 entradas para armazenar o tempo de chegada dos pacotes (*timestamp*); 4) o filtro de nós candidatos limitado ao valor 8 para ETX, dado que valores menores resultaram em isolamento dos nós; e 5) a métrica PTR foi combinada ao valor de *rank* para dispensar o recipiente DAG.

- Os parâmetros de configuração da combinação NIAP-OF/NIAP descritos no Capítulo 3 foram assim ajustados: 1) o limiar de dois milijoules por minuto para histerese ($pst = 2mJ/min$), que em experimentos preliminares resultaram em rápida convergência para os caminhos com o menor consumo de energia, limiares maiores poderiam reduzir as trocas de nó pai, porém a convergência para os melhores caminhos seria postergada; e, 2) a métrica NIAP foi combinada ao valor de *rank* para dispensar o recipiente de métrica DAG.

Por fim, em todas as configurações o valor de incremento de *rank* foi configurado para 128 ($Rank_{inc} = 128$), visando caminhos com poucos saltos, sem laços de roteamento, e priorizar o desempate por custos de métricas.

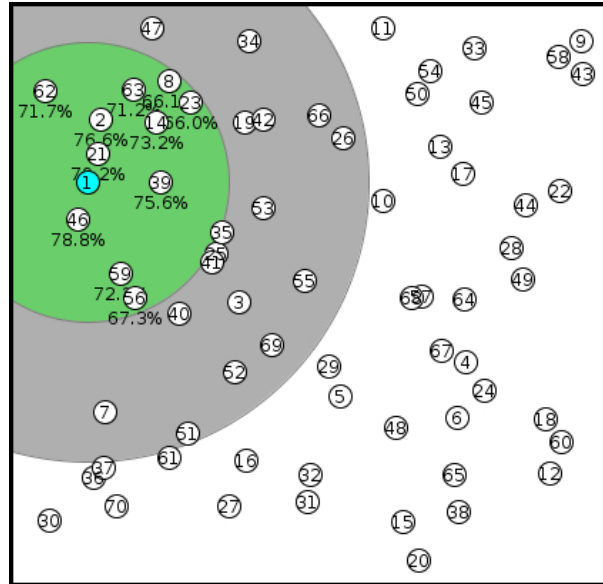
4.1.4 Cenário de Simulação

Excetuando os experimentos prévios, que foram configurados para identificar situações específicas conforme Seção 4.2, os experimentos completos foram realizados no cenário de simulação que se segue. As topologias foram preparadas com o tamanho de 10 a 100 nós (de 10 em 10), em que todos os nós, inclusive o nó raiz, foram dispostos aleatoriamente em uma área de 200 por 200 metros. Cuidou-se para que todos os nós pudessem alcançar o nó raiz por ao menos dois caminhos diferentes. O intuito foi simular um ambiente interno (*indoor*) de rede sem fio em que o alcance da comunicação entre os nós foi configurado para um raio de até 50 metros, e raio de até 100 metros para interferência. Dentro do raio de comunicação entre os nós foi configurada a taxa de recepção de pacotes entre 60% e 80% dada a distância entre os nós (os detalhes sobre essa escolha estão na Subseção 4.2.3). O nó raiz foi simulado com alimentação de energia contínua e os demais nós iniciaram a sua operação com a bateria carregada com 15 joules. A Figura 6 é o desenho de uma topologia de exemplo com 70 nós em que se destaca o nó raiz. O disco menor delimita o alcance para comunicação do nó raiz e o disco maior delimita o alcance de interferência, os percentuais representam a taxa de recepção com os nós adjacentes.

Antes da execução das simulações, cada um dos cenários recebeu uma semente aleatória (*random seed*) diferente dos demais. Durante a execução dos cenários, cada um dos nós aguardou o tempo de um segundo para iniciar a sua operação. Após inicializar, cada nó aguardou 60 segundos antes de enviar mensagens por UDP, tempo suficiente para o RPL convergir para uma topologia estável. A carga útil das mensagens UDP foi fixada em 20 bytes. Na sequência, de maneira uniforme e contínua, os nós enviaram essas mensagens a cada 60 segundos para alcançar

o nó raiz. A Tabela 4 resume os parâmetros utilizados para o cenário de simulação.

Figura 6 – Exemplo de uma topologia de 70 nós formada aleatoriamente. O nó selecionado é o raiz, o disco menor ao seu redor delimita o alcance de sua comunicação, o disco maior delimita o alcance da sua interferência.



Fonte: Capturada do simulador (CONTIKI, 2020).

Tabela 4 – Parâmetros para o cenário de simulação.

Parâmetros	Valores
Tamanho da Rede	10–100 nós
Área	200m x 200m
Alcance (raio)	50m
Interferência (raio)	100m
Taxa de Recepção de Pacotes	60%–80%
Carga Inicial das Baterias	15J
Tempo de Inicialização Aleatória	1s
Tempo de Configuração	60s
Intervalo de Envio entre Mensagens	60s
Carga Útil das Mensagens	20 bytes

Fonte: Autoria própria.

4.1.5 Medidas de Desempenho

A eficiência energética se refere não apenas à economia de energia mas também ao uso eficiente dessa energia para a entrega de pacotes ou para a sobrevivência da rede, as seguintes medidas foram aplicadas:

- Tempo de vida da rede até a primeira exaustão de um nó ou a Primeira Morte de um Nó (FDN, do inglês *First Dead Node*): o uso eficiente de energia para manter a topologia inteira em operação pelo máximo de tempo possível antes que qualquer nó falhe por exaustão de energia da bateria;
- Consumo de energia: o uso eficiente de energia por parte dos nós para o processamento de algoritmos e encaminhamento de pacotes;
- Percentual de nós em operação ou a porção de nós vivos: o uso eficiente de energia para manter uma parte da topologia operando pelo maior tempo possível, principalmente os nós intermediários responsáveis por encaminhar a maioria dos pacotes. Essa medida também auxilia na visualização do balanceamento de carga entre os nós intermediários.

A confiabilidade de uma rede remete à capacidade que os nós tem de enviar, encaminhar e receber pacotes com sucesso, ou seja, evitar ao máximo as perdas. Foram aplicadas duas medidas de desempenho:

- Total de pacotes entregues com sucesso: que é a capacidade de escolher caminhos confiáveis para entregar com sucesso a maior quantidade de pacotes possível, dado o tempo de operação dos nós ou da rede;
- Taxa de Entrega de Pacotes (PDR, do inglês *Packet Delivery Ratio*): é o percentual de pacotes que são entregues com sucesso, ou seja, a capacidade de escolher caminhos em que há uma probabilidade menor de perda de pacotes.

Em algumas aplicações é desejável que as informações sejam recebidas o mais rápido possível, ou seja, uma comunicação em tempo real. As seguintes medidas de desempenho foram utilizadas para esse propósito:

- Atraso médio fim-a-fim: que é a capacidade de escolher caminhos em que há o menor atraso na entrega de pacotes entre as aplicações de origem e destino;
- Contagem média de saltos: que é a capacidade de criar e manter caminhos com a menor quantidade de saltos para reduzir a latência de roteamento.

Por fim, consideram-se estáveis as redes em que se mantém o maior tempo possível em operação sem modificar suas tabelas de roteamento, visto que podem incrementar o processa-

mento e o consumo de energia e, conseqüentemente, aumentar as perdas e a latência. Para isto foi utilizada a seguinte medida de desempenho:

- A quantidade de troca de nós pais: a capacidade de manter a topologia estável pelo maior período de tempo possível e realizar a troca de nós pais somente quando necessário.

4.1.6 Considerações

Para executar experimentos que representem o comportamento da *Internet* das Coisas, é necessário que as ferramentas simulem modelos de redes sem fio e, também, que os nós suportem a pilha de protocolos IPv6, inclusive o RPL. O simulador COOJA é uma ferramenta comum na academia que atende à esses quesitos, um ambiente completo para executar variados cenários de IoT. Nesta pesquisa, a métrica proposta foi testada com esse repertório, os registros dos experimentos foram tabulados para identificar melhorias em eficiência energética e confiabilidade em comparação às métricas ETX e PTR.

4.2 PRÉVIAS

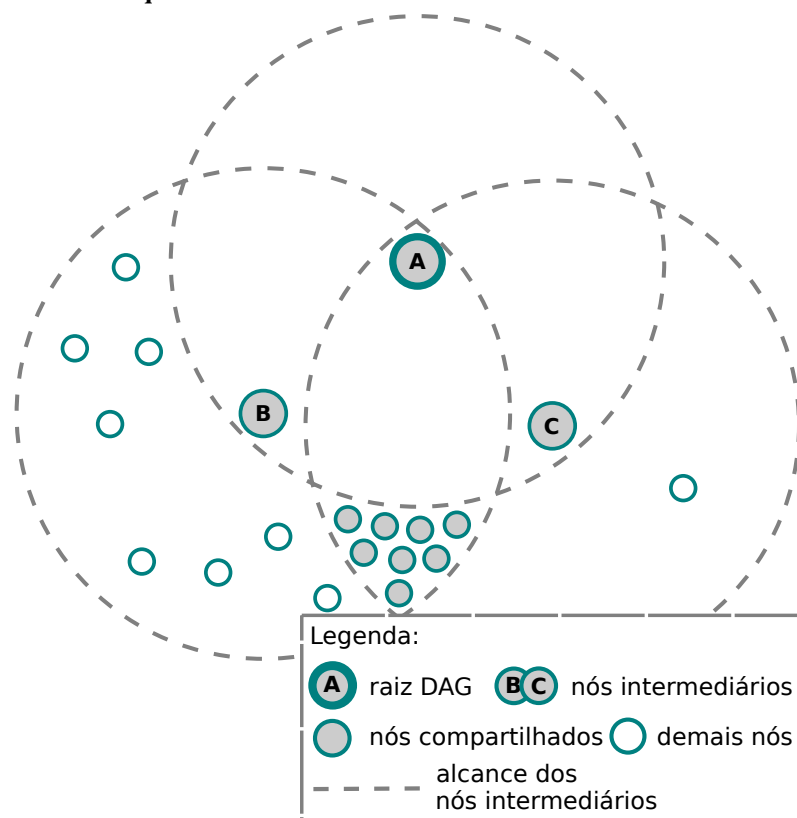
Antes de apresentar os resultados principais de suas soluções, é comum que as pesquisas percorram por uma bateria de configurações e experimentos prévios para estabelecer parâmetros e solucionar problemas pontuais. Da mesma maneira, esta pesquisa também contou com muitos experimentos preliminares para formar a métrica proposta e ajustar os parâmetros dos cenários de simulação. Na sequência, esta Seção apresenta os ensaios prévios de relevância: uma topologia conhecida na literatura para testes de balanceamento de carga, os experimentos prévios para os ajustes de limiares e os ajustes de parâmetros. Por fim, um experimento adicional para identificar o impacto na exaustão de energia com relação ao código-fonte das métricas implementadas.

4.2.1 Balanceamento de Carga

Uma topologia encontrada na literatura para avaliar o balanceamento de carga está no trabalho de (QASEM *et al.*, 2016). Os autores apresentaram a LBOF com a métrica de Contagem de Nós Filhos (CNC, do inglês *Child Node Count*) para obter o melhor balanceamento de carga em relação à MRHOF. Dessa maneira, essa topologia foi reproduzida no simulador COOJA conforme ilustrado na Figura 7, a qual foi constituída por 20 nós: 1 nó raiz (A), 2 nós

intermediários (B e C), 8 nós compartilhados entre B e C, e 9 nós adicionais para ampliar os domínios de colisão. Os nós compartilhados foram assim dispostos para obter o melhor custo de métrica dos nós intermediários e colaborar com a análise do balanceamento de carga. O nó intermediário B ficou situado no domínio com a maior probabilidade de colisão, pois havia 17 nós ao seu alcance em comparação aos 10 nós que estavam ao alcance do nó intermediário C. Além disso, dentre esses 17 nós, 8 nós não alcançavam o nó intermediário C diretamente, restando como melhor opção selecionar o nó intermediário B como o nó pai para encaminhamento até o nó raiz. Portanto, obter o balanceamento de carga nesse cenário se tornou um desafio, pois a posição dos nós nessa topologia levou à sobrecarga e à rápida exaustão de energia do nó intermediário B.

Figura 7 – Topologia implementada em experimentos prévios em que os nós monitorados tentaram alcançar o nó raiz pela escolha de um dos dois nós intermediários. Cenário implementado para comparativo de balanceamento de carga entre quatro métricas de roteamento.

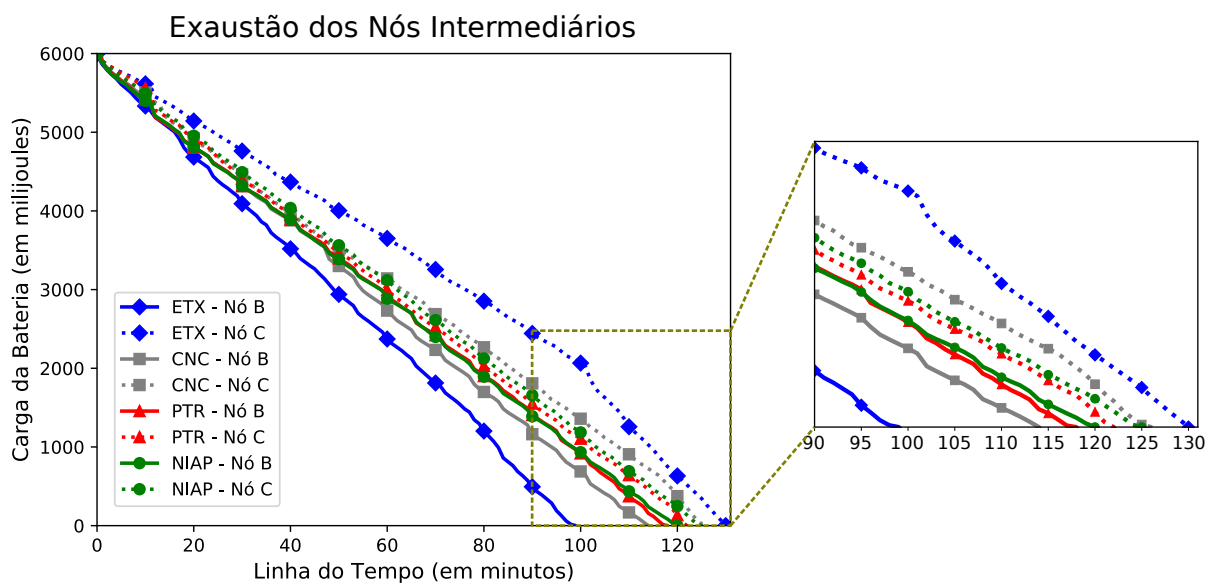


Fonte: Topologia reproduzida de (QASEM *et al.*, 2016).

Foram testadas quatro métricas de roteamento: ETX, CNC, PTR e NIAP. A métrica CNC foi implementada junto à LBOF para contabilizar a quantidade de nós filhos através de mensagens DAO e *No-Path* DAO que, respectivamente, são as mensagens que anunciam o ingresso e o egresso dos nós em determinado caminho de roteamento. A métrica CNC foi

apresentada por (QASEM *et al.*, 2016) e a contabilização de nós filhos por mensagens DAO foi descrita pelos mesmos autores em (QASEM *et al.*, 2017). O resultado desses experimentos pode ser visualizado no Gráfico 1, em que cada nó intermediário recebeu seis joules de carga inicial em suas baterias. Neste gráfico fica evidente que a métrica ETX pouco contribuiu para o balanceamento de carga, o nó intermediário B exauriu rapidamente (aos 99 minutos) para então deixar toda a carga de roteamento para o nó intermediário C, que exauriu aos 131 minutos. A métrica PTR colaborou para o menor intervalo de tempo de exaustão entre os nós intermediários, 4 minutos. Porém, a NIAP contribuiu para o maior tempo de vida da LLN até a primeira exaustão de um nó, pois o nó intermediário B exauriu aos 120 minutos. Além disso, o tempo de operação dos nós intermediários (tempo de vida dos nós B e C somados) foi maior com a métrica NIAP: 245 minutos comparados aos 240, 240 e 230 minutos com as métricas PTR, CNC e ETX, respectivamente. Adicionalmente, o maior tempo de operação desses nós representou melhoria nas taxas de entrega, as quais foram 95,4%, 95,2%, 93,9% e 92,2%, com as métricas NIAP, PTR, CNC e ETX, respectivamente. Esse experimento limitado mostrou que as topologias de LLNs possuem domínios de colisão que afetam o balanceamento de carga, e que a NIAP é capaz de evitá-los e auxiliar na tomada de decisão pelo melhor caminho de roteamento.

Gráfico 1 – Este gráfico mostra a exaustão de bateria dos nós intermediários B e C de acordo com quatro métricas de roteamento. A métrica NIAP resultou em maior tempo de operação dos nós intermediários.

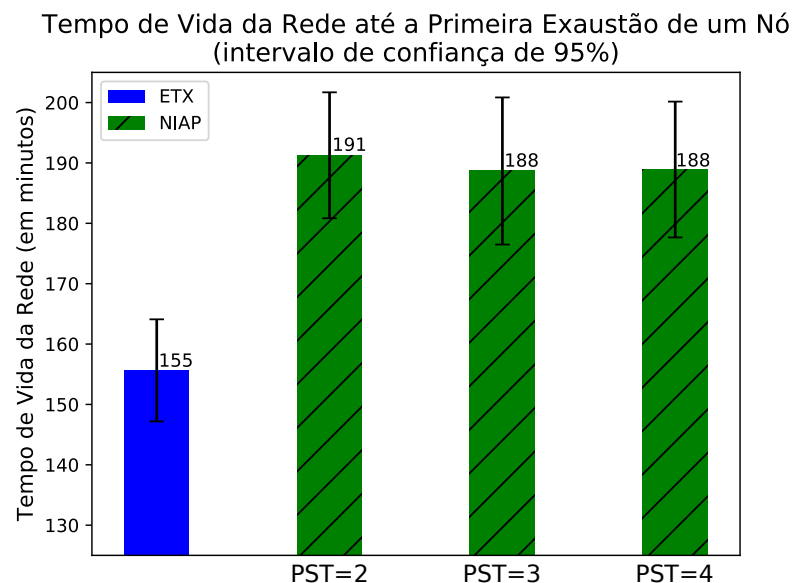


Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Calibração de Limiares

O mecanismo de histerese faz parte da função objetivo para evitar que a troca excessiva de nós pais resulte em instabilidade em uma topologia de roteamento. Para isso, a NIAP-OF conta com um valor de Limiar para Troca de Nó Pai (PST, do inglês *Parent Switch Threshold*). O Gráfico 2 mostra o resultado de experimentos consistentes em que se levou em conta o intervalo de confiança de 95% sobre 45 amostras (cada amostra é o resultado de um experimento sobre uma topologia aleatória). Esses resultados foram obtidos em topologias de 70 nós de acordo com a Seção 4.1. Nota-se que o tempo de vida da rede com a NIAP reduziu quando o valor de limiar passou de 2 para 3 e 4 mJ/min (milijoules por minuto). A plataforma utilizada nos experimentos, Contiki OS sobre TMoteSky, possuía limitações de processamento e os custos de métrica foram representados por números inteiros. Por isso, o limiar de 1 mJ/min precisaria de arredondamento e levaria os nós a trocarem excessivamente de nós pais, dispensando, obviamente, o mecanismo de histerese. Por fim, optou-se pelo limiar de 2 mJ/min, uma vez que o objetivo da NIAP é convergir rapidamente para caminhos que consomem menos energia. Assim, visando não estender a pesquisa, os experimentos com o limiar acima de 4 mJ/min foram reservados para estudos futuros.

Gráfico 2 – Este gráfico mostra o tempo de vida da rede obtido com as métricas ETX e NIAP, a última com diferentes limiares. Foi identificado o melhor resultado com o limiar de dois milijoules por minuto para a métrica NIAP.



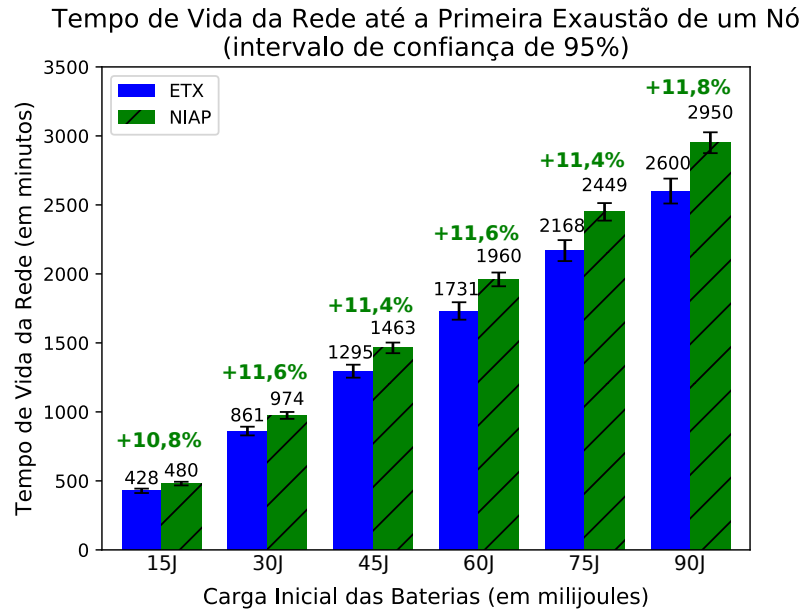
Fonte: Autoria própria.

4.2.3 Ajustes de Parâmetros

Um dos primeiros problemas encontrados em experimentos em LLNs é mensurar o tempo necessário para executar o cenário de simulação até que este resulte em informações confiáveis. Por um lado, executar experimentos por um curto período de tempo poderiam não representar a realidade dessas redes, como é o caso do algoritmo de *trickle* que faz com que as mensagens de controle do RPL sejam postergadas por horas, o que interfere na precisão das métricas baseadas em eficiência energética. Por outro lado, realizar experimentos por longos períodos de tempo poderiam onerar e atrasar desnecessariamente a pesquisa, como é o exemplo de (KAMGUEU *et al.*, 2013) que, para aproximar a simulação de uma bateria com carga parcial, executou experimentos por treze dias para obter resultados que, possivelmente, poderiam ser obtidos em algumas horas. Para tanto, nesta pesquisa, um cenário foi preparado com topologias de 20 nós dispostos aleatoriamente, em que cada nó recebeu uma carga inicial de 15 a 90 joules. O resultado desses experimentos está no Gráfico 3, no qual o tempo de vida da rede obtido com as métricas ETX e NIAP em 38 amostras é apresentado com o intervalo de confiança de 95%. Nota-se que o ganho obtido com a métrica NIAP em cargas de 90 joules foi de aproximadamente 1% maior em comparação ao resultado obtido com cargas de 15 joules. Um ganho pouco significativo no que se trata do tempo real de execução das simulações. Considerando o tempo gasto até a exaustão de todos os nós, cada experimento com carga de 15 joules precisou de aproximadamente 141 minutos (2,35 horas) de processamento em um núcleo de 3,2 GHz, no caso de 90 joules foram necessários aproximadamente 846 minutos (14,1 horas). Por fim, considerando esses resultados, optou-se manter a carga inicial de 15 joules para os demais experimentos desta pesquisa.

Outro parâmetro importante a ser considerado para os experimentos em LLNs se refere a uma das suas principais características: a perda de pacotes. Na literatura esse parâmetro recebe a nomenclatura de Taxa de Perda de Pacotes (PLR, do inglês *Packet Loss Ratio*) ou, pelo seu inverso, de Taxa de Entrega de Pacotes (PDR) ou, ainda, de Taxa de Recepção de Pacotes (PRR, do inglês *Packet Reception Ratio*). Porém, não se refere a uma medida de desempenho, mas sim ao descarte aleatório de pacotes para representar perdas no meio físico. Ao buscar em RFCs sobre essa informação, os documentos RFCs 5548, 6550 e 7228 descrevem, em resumo, que as LLNs possuem enlaces instáveis, muitas perdas e variabilidade na taxa de entrega. No entanto, estes não quantificam essas perdas. O documento RFC 6687, por sua vez, descreve a simulação

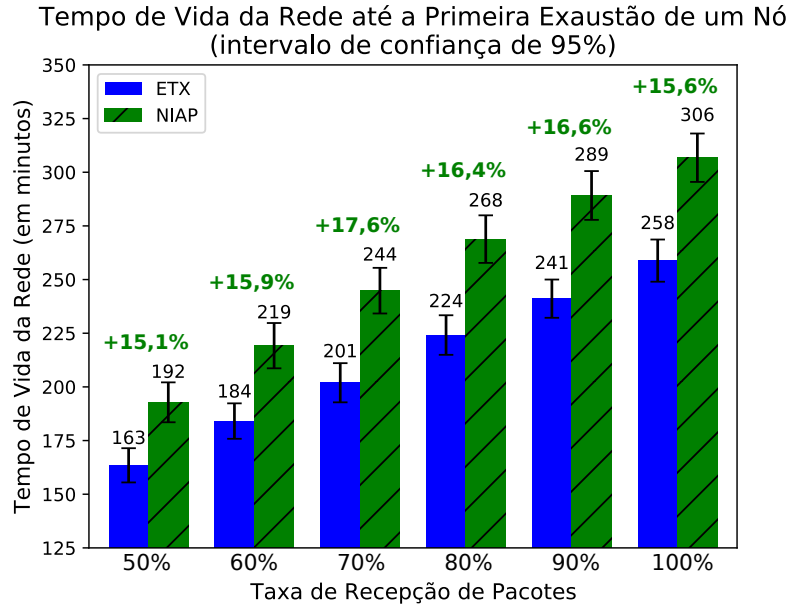
Gráfico 3 – Este gráfico mostra o tempo de vida da rede obtido com diferentes cargas iniciais para as baterias. Foi identificado que a carga inicial de 15 joules resultou em pouco prejuízo no tempo de vida da rede com o benefício de reduzir o tempo real da simulação.



Fonte: Autoria própria.

de uma LLN com taxas de entrega coletadas de uma LLN real, os autores relatam que em muitos enlaces foram simuladas taxas variáveis entre 30% e 80%. Ao buscar na literatura, trabalhos como os de (QASEM *et al.*, 2015) e de (YASSEIN *et al.*, 2019) mostraram que a MRHOF resultou em melhores resultados sobre simulações com a taxa de entrega de 60%. Em outros trabalhos, os autores de (LAMAASI; BENAMAR, 2018), como por exemplo, optaram pela taxa de recepção de 100% e, em outro exemplo, (BHANDARI *et al.*, 2018) simularam taxas de recepção entre 45%–100% conforme a topologia ilustrada no próprio trabalho. Em relato no site *IETF Journal* em 2010 (BORMANN *et al.*, 2010), os autores de importantes documentos RFCs observaram que, quando se avalia a taxa de perda de pacotes, considera-se elevado os valores entre 5%–10%. Nota-se que não há um consenso na literatura em geral de como estipular esse parâmetro, no entanto, é necessário simular alguma perda para representar os domínios de colisão. Foram executados experimentos prévios sobre topologias aleatórias de 50 nós em que foram testadas diferentes taxas de recepção no meio físico (de 50% a 100%). Os resultados apresentados no Gráfico 4 se encontram no intervalo de confiança de 95% sobre 77 amostras. Nota-se que a diferença no tempo de vida da rede entre as métricas ficou em torno de 16%. Dado o que foi investigado, optou-se por taxas de recepção entre 60%–80% para os experimentos desta pesquisa.

Gráfico 4 – Este gráfico mostra o tempo de vida da rede obtido com diferentes taxas de recepção de pacotes configuradas para o meio físico simulado. Foi identificado que o aumento na perda de pacotes reduziu o tempo de vida da rede, mas a diferença entre as métricas se manteve em torno de 16%.

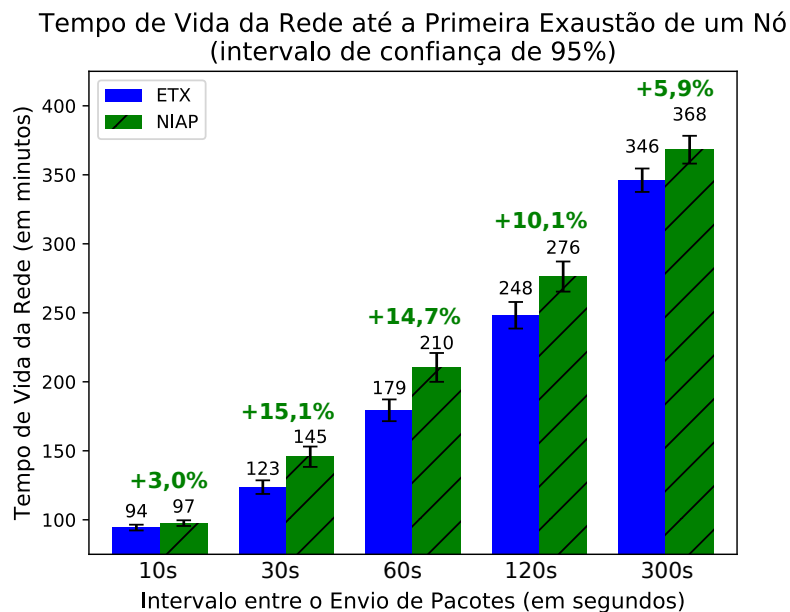


Fonte: Autoria própria.

O intervalo entre o envio de mensagens de dados também foi um parâmetro fixado nesta pesquisa. De acordo com os documentos RFCs que originaram o RPL, esse intervalo varia significativamente de acordo com a aplicação e o ambiente em que se encontra a LLN. Especificamente no documento RFC 5673, para LLNs industriais, esse intervalo pode variar de um pacote por segundo para até um pacote por hora, considerando dados enviados por mensagens dos nós sensores para o nó raiz. Nos experimentos descritos no documento RFC 6687 os pacotes com dados foram gerados a cada 10 segundos. Em outro documento RFC, 5867, há uma descrição de exemplo em que LLNs compostas por sensores alimentados por baterias poderiam notificar o nó raiz com mensagens de dados a cada minuto, com o objetivo de estabilizar o consumo de energia. Para tanto, um experimento foi preparado com topologias aleatórias compostas por 50 nós que geraram mensagens de dados nos intervalos de 10, 30, 60, 120 e 300 segundos. Os resultados apresentados no Gráfico 5 mostram o tempo de vida da rede obtido com o intervalo de confiança de 95% sobre 60 amostras. Nota-se que a menor diferença entre as métricas ocorreu no intervalo de 10 segundos, visto que esse tráfego alcançou os limites da plataforma TMoteSky e resultou em sobrecarga de roteamento, situação similar e esclarecida em (PEREIRA *et al.*, 2019). Observa-se, porém, que o percentual entre as métricas decresce nos intervalos de 30 a 300 segundos, isso ocorre porque consequentemente as métricas passam a receber cada vez

menos informações do tráfego da rede para auxiliar na tomada de decisão. Por fim, optou-se nesta pesquisa configurar os nós sensores para enviar mensagens de dados a cada 60 segundos de maneira uniforme, por dois motivos: 1) esse intervalo foi suficiente para não sobrecarregar imediatamente os nós devido a plataforma simulada, pois foi o que ocorreu nos intervalos de 10 segundos, e 2) conforme descreve o documento RFC 5867, o envio de mensagens de dados a cada 60 segundos é um exemplo de comportamento típico de LLNs prediais, em que os nós operam a bateria e possuem ciclos de trabalho. Além disso, o documento RFC 5673 também relata que o intervalo médio para transmissão de mensagens de dados em LLNs industriais se encontra pouco abaixo de um minuto.

Gráfico 5 – Este gráfico mostra o tempo de vida da rede obtido com diferentes intervalos para o envio de mensagens. Foi identificado que a menor diferença entre as métricas ocorreu aos 10 segundos de intervalo, pois houve sobrecarga devido à limitação da plataforma. Também foi identificada uma diferença decrescente entre as métricas quando o intervalo de envio foi incrementado.



Fonte: Autoria própria.

4.2.4 Análise de Código

Durante os experimentos prévios foi constatado o crescimento linear do processamento das métricas ETX, PTR e NIAP, proporcional à quantidade de nós em que se adicionava à topologia. No entanto, foi necessário executar experimentos adicionais para encontrar o custo energético do processamento dessas métricas para comparar ao consumo dispensado para a

comunicação na rede, com o intuito de situar a colaboração da métrica proposta nesse contexto. Para identificar esses custos foram realizados experimentos adicionais em topologias aleatórias com 70 nós durante 100 minutos de simulação. A média obtida de 10 amostras foi utilizada para construir a Tabela 5 em que o processamento necessário para realizar uma atualização de custo de métrica (NIAP ou PTR) é apresentado como percentual de consumo energético em comparação à uma atualização de métrica ETX. Como resultado, foi identificado que o tempo de uso da CPU para uma atualização de métrica PTR foi 4,2 vezes maior do que com a ETX, e uma atualização de métrica com a NIAP custou 8,2 vezes mais do que com a ETX. Entretanto, as atualizações foram executadas em momentos diferentes: a) a ETX foi atualizada quando houve um retorno (*feedback*) sobre a entrega de um pacote; b) a PTR foi atualizada a cada vez em que o nó encaminhava um pacote, e c) a NIAP foi atualizada um pouco antes do envio de uma mensagem DIO. Ademais, a frequência de atualização das métricas também diferiu: com a PTR foram realizadas 52% de atualizações a menos do que com a ETX, e com a NIAP foram 94% de atualizações a menos. Assim, o custo energético total somente com as atualizações de métrica durante 100 minutos, foi 98% maior da PTR em comparação à ETX, a NIAP, por sua vez, consumiu 57% menos. Porém, ainda não é conclusivo, pois uma atualização de métrica pode disparar outros mecanismos que exigem processamento na rede, como é o caso das trocas de nós pais. Foi identificado que com a NIAP houve 39% a mais de trocas do que com a ETX, e com a PTR houve 28% de trocas a menos. Por fim, considerando o tempo total dispensado pela CPU com cada uma das métricas, o que equivale à energia dispensada para processamento, pode-se dizer que a ETX é a métrica com a melhor eficiência em complexidade de *software*, posto que a PTR e a NIAP precisaram de mais energia para processamento, consumindo respectivamente 0,3% e 1,8% à mais do que a ETX, uma diferença significativamente baixa em comparação ao consumo total de energia.

Tabela 5 – Custo de energia para atualizar as métricas PTR e NIAP em comparação à ETX, durante 100 minutos de simulação.

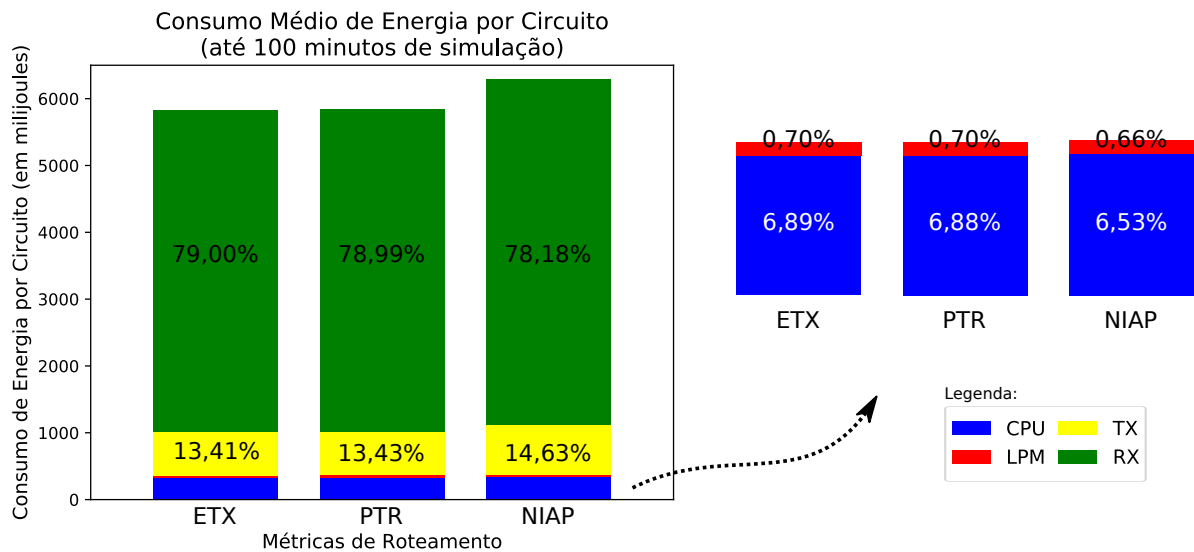
Informações em comparação à métrica ETX	PTR	NIAP
Uma atualização de métrica	+420%	+820%
Frequência de atualizações de métrica	-52%	-94%
Gasto de energia somente com atualizações	+98%	-57%
Frequência de trocas de nós pais	-28%	+39%
Gasto total de energia com processamento	+0,3%	+1,8%

Fonte: Autoria própria.

No que se trata de quantidade de energia dispensada para atividades de rede, como

demonstrado no trabalho (DUNKELS *et al.*, 2007), o consumo de energia por processamento é significativamente menor em comparação ao consumo de energia da interface de rede. O Gráfico 6 apresenta o consumo de energia em milijoules, que foi obtido durante esses experimentos. Nota-se que o consumo de energia em processamento (CPU e LPM) com as métricas da base comparativa não excedeu 8% do consumo total, a maior parte foi despendida pela interface de rede.

Gráfico 6 – Gráfico do consumo médio de energia por circuito da plataforma Contiki/TMoteSky em experimento simulado por 100 minutos. Comparativo entre as métricas ETX, PTR e NIAP que resultaram em consumos de 4812, 4830 e 5164 milijoules, respectivamente.



Fonte: Autoria própria.

4.2.5 Considerações

Uma LLN inserida em um ambiente de segurança com monitoração física, como exemplo os sensores de presença, pode exigir que todos os nós operem o máximo de tempo possível. Para tanto, a medida de tempo de vida da rede foi utilizada nesses experimentos, e mostraram que a NIAP é uma solução de métrica que pode contribuir com o RPL nesses casos. No entanto, os ensaios prévios contribuíram principalmente para os ajustes de parâmetros, ou seja, esses resultados foram apenas uma preparação para a conseguinte avaliação detalhada sobre experimentos comparativos e mais consistentes para a validação da proposta.

4.3 RESULTADOS

Esta Seção apresenta os resultados de 1800 experimentos simulados: o comparativo entre as 3 métricas de roteamento (ETX, PTR e NIAP) em 60 topologias aleatórias para cada tamanho de rede (de 10 a 100 nós). Esses resultados foram tabulados e normalizados em relação à métrica ETX, para então serem representados graficamente. Foi utilizado o intervalo de confiança de 95%, mas para melhor visualização cada ponto ilustrado nos gráficos corresponde à média aritmética de 60 amostras. Na sequência, apresenta-se a análise dos resultados conforme as medidas de desempenho que foram adotadas. Todos os gráficos desta Seção equivalem aos antes apresentados no trabalho (PEREIRA *et al.*, 2020).

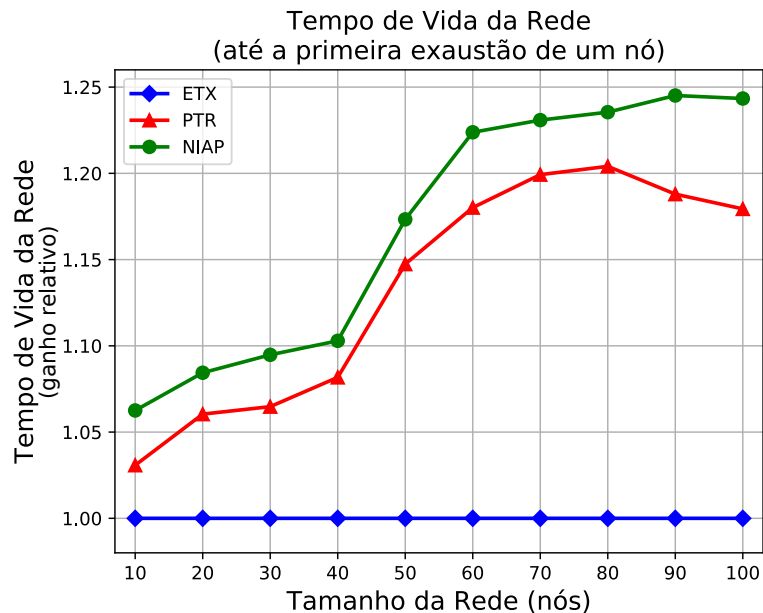
4.3.1 Eficiência Energética

Para gerar o Gráfico 7, o extrato da exaustão de bateria de cada nó foi coletado de minuto em minuto. Assim, então, o registro do momento em que houve a primeira exaustão completa da bateria de um nó, este foi assumido como o tempo de vida dessa rede. Pode-se dizer, também, que esse nó, possivelmente situado no maior gargalo de tráfego da rede, foi o primeiro nó a morrer (FDN). A métrica NIAP apresentou ganhos significativos em relação à métrica ETX, de 6% até 24% partindo das topologias menores, com 10 nós, para as topologias maiores e densas com 100 nós. A métrica PTR também foi superada pela NIAP, que inclusive teve redução nos ganhos a partir das topologias de 90 nós, pois foi alcançado o limite de armazenamento utilizado para registrar o tempo de chegada dos pacotes, conforme descrito na Subseção 4.1.3. Se considerar, como exemplo, que duas baterias levam aproximadamente 23 anos para exaurir em um nó com sensoriamento de temperatura (MORIN *et al.*, 2017), então a métrica NIAP em uma topologia de 100 nós, em comparação à métrica ETX, possibilitará que esses nós operem por mais cinco anos e meio sem receberem uma manutenção de carga.

A Figura 8 mostra a captura de uma topologia de amostra que foi utilizada durante os experimentos. Essa topologia foi ilustrada para destacar os nós intermediários que primeiro exauriram com cada uma das métricas. O nó 4 foi o primeiro a exaurir, pois estava localizado no gargalo de tráfego nesse cenário. Esta ilustração mostra que, quando o primeiro nó exauriu com a métrica NIAP (Figura 8c) aos 218 minutos, nesse mesmo momento já havia exaurido a bateria de 3 nós intermediários com a métrica PTR (Figura 8b), e a bateria de 5 nós intermediários com a métrica ETX (Figura 8a). Essa amostra, retirada de uma topologia com 50 nós, mostra que a

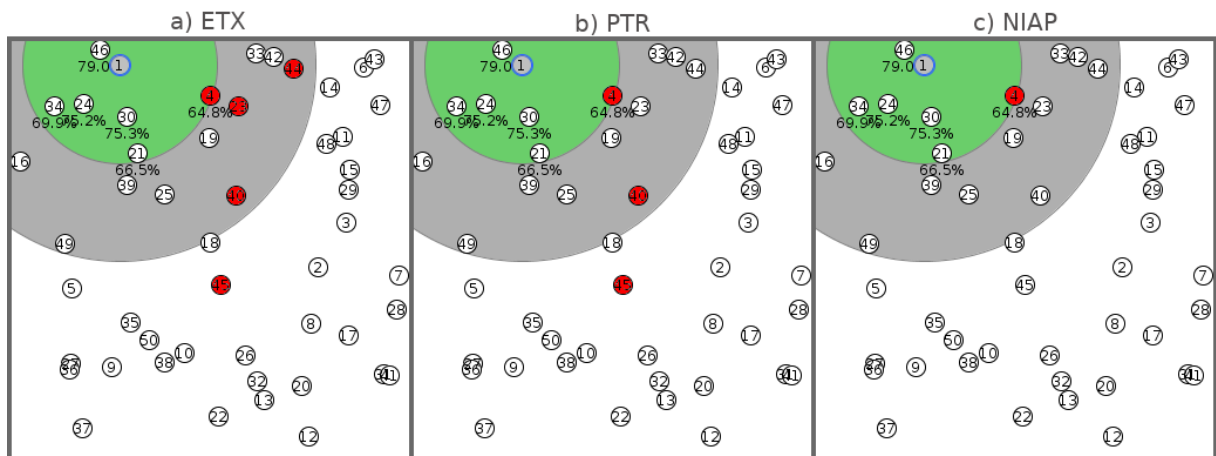
métrica NIAP, além de colaborar para estender a vida do nó intermediário principal, também permitiu aos nós intermediários restantes entregarem pacotes por mais tempo.

Gráfico 7 – Gráfico do tempo de vida da rede até a primeira exaustão de um nó. Os valores obtidos com a métrica de referência, em ordem de tamanho da rede, são: 469, 307, 240, 210, 179, 163, 153, 142, 139 e 135 minutos.



Fonte: Autoria própria.

Figura 8 – Ilustração de uma amostra de topologia com 50 nós que destaca os nós intermediários que exauriram com a métrica ETX (a) e com a métrica PTR (b) quando houve a primeira exaustão com a métrica NIAP (c).

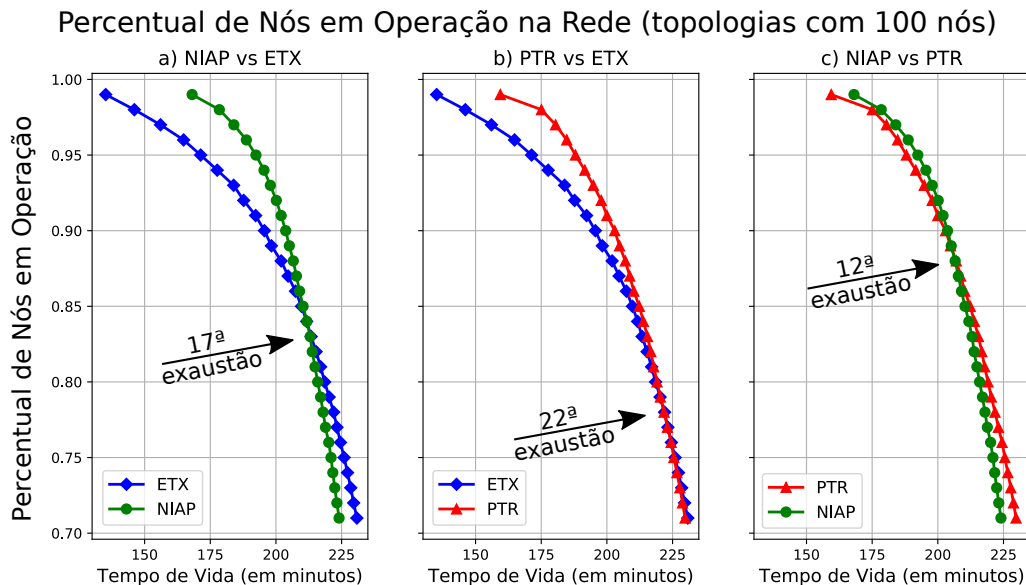


Fonte: Autoria própria.

Uma análise detalhada da exaustão dos nós intermediários pode ser visualizada nos Gráficos 8a, 8b e 8c. Estes foram gerados com valores absolutos de exaustão dos nós intermediários em experimentos realizados com as topologias aleatórias que foram constituídas por 100

nós. Estes gráficos mostram, em minutos, as 30 primeiras exaustões para a comparação entre as métricas. A linha decrescente mais próxima da forma vertical mostra que os nós exauriram quase ao mesmo momento, indicando que houve balanceamento de carga.

Gráfico 8 – Gráficos do percentual de nós em operação na linha do tempo em topologia simulada com 100 nós. São três os gráficos para a comparação entre as métricas: a) NIAP versus ETX, b) PTR versus ETX e c) NIAP versus PTR. As setas apontam para o momento em que as linhas se cruzaram.



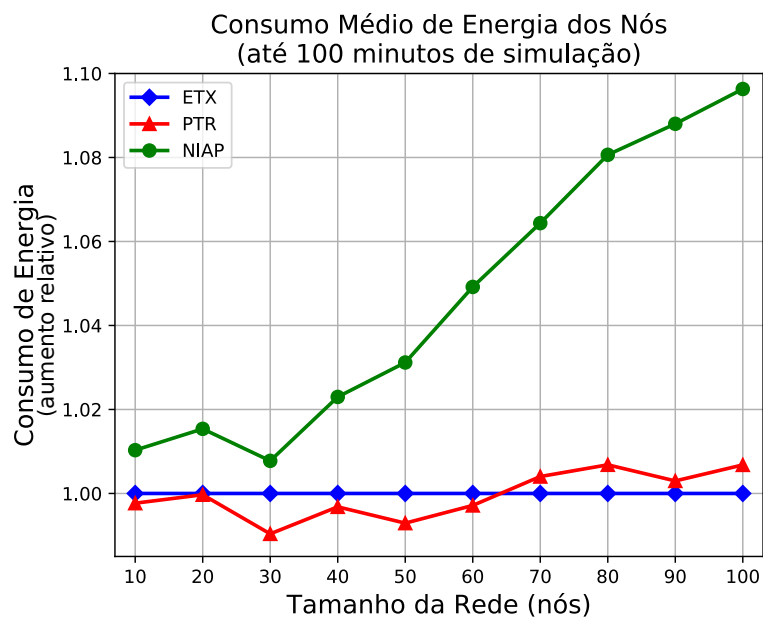
Fonte: Autoria própria.

O primeiro (Gráfico 8a) mostra que a NIAP manteve 16 nós operando por mais tempo que a métrica ETX, a seta aponta para a 17ª exaustão. O segundo (Gráfico 8b) mostra que a PTR manteve 21 nós operando por mais tempo que a métrica ETX, a seta aponta para a 22ª exaustão. Mas ao comparar diretamente as métricas PTR e NIAP (Gráfico 8c), esta manteve 11 nós operando por mais tempo, a seta aponta para a 12ª exaustão. Sabe-se, no entanto, que os primeiros nós a exaurirem foram os nós localizados no gargalo de tráfego da topologia, e esses gráficos mostram que a métrica NIAP contribuiu para o balanceamento de carga e estendeu o tempo de operação dos nós intermediários em LLNs.

Nestes experimentos não foram registradas exaustões de nós antes dos 100 primeiros minutos de simulação. Para tanto, os registros obtidos nesse intervalo foram utilizados para calcular a quantidade média de energia despendida pelos nós. Esses resultados são apresentados no Gráfico 9. Observa-se que as topologias de 10 nós resultaram em maior consumo médio de energia com a métrica ETX, isso ocorreu pois essas topologias foram criadas para garantir que cada nó pudesse alcançar o nó raiz por ao menos dois caminhos diferentes. Assim todos os nós

dessas topologias ficaram situados praticamente no mesmo domínio de colisão. Portanto, as topologias de 30 a 100 nós foram melhor distribuídas na área de 200 por 200 metros. Em todos os cenários a métrica NIAP resultou em maior consumo médio de energia. Em comparação à métrica ETX, esse consumo cresceu de 0,7% na topologia esparsa de 30 nós para até 9,6% na topologia densa de 100 nós. Já o consumo com a métrica PTR se manteve próximo ao consumo com a métrica ETX.

Gráfico 9 – Gráfico do consumo médio de energia dos nós durante os primeiros 100 minutos de simulação. Os valores obtidos com a métrica de referência, em ordem de tamanho da rede, são: 6,11, 5, 4,82, 4,82, 4,95, 5,06, 5,23, 5,44, 5,71 e 5,91 joules.



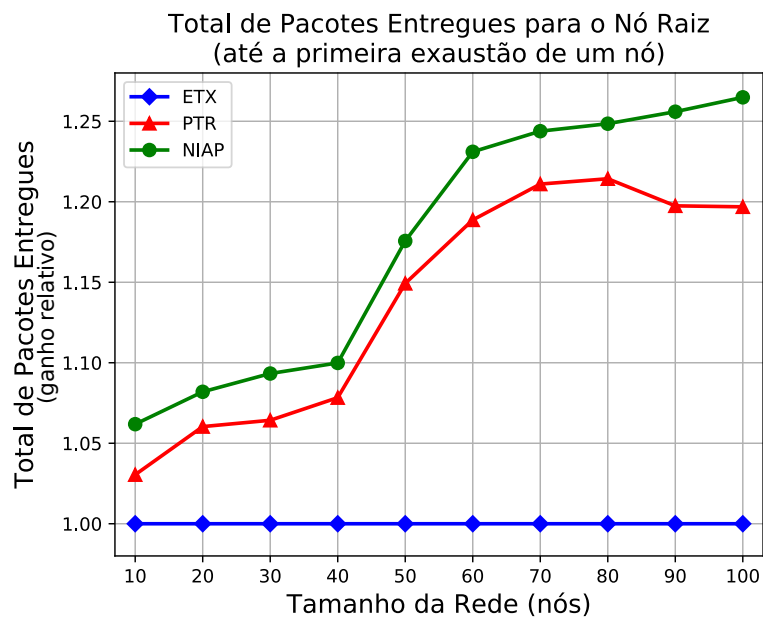
Fonte: Autoria própria.

A métrica NIAP fez com que os nós buscassem por caminhos com baixo consumo de energia, o que em contrabalanço resultou em muitas trocas de nós pais. Uma troca de nó pai exige processamento adicional e pode desencadear atualizações em sub-árvores. Nota-se, portanto, que com a NIAP os nós despenderam de mais energia para manter os caminhos que não sobrecarregassem os nós intermediários, isto é, 9,6% a mais de consumo individual dos nós resultou em 24% a mais do tempo de vida da LLN (em contraste com o Gráfico 7), considerando a topologia de 100 nós.

4.3.2 Confiabilidade

Nestes experimentos cada nó foi configurado para periodicamente enviar mensagens de dados para o nó raiz. Todos os pacotes (com mensagens de dados) que chegaram com sucesso ao nó raiz antes da primeira exaustão de um nó, foram contabilizados para formar o Gráfico 10. O resultado do tempo de vida da rede, apresentado no Gráfico 7, é similar a este, pois a finalidade foi mostrar que o ganho na entrega de pacotes foi proporcional ao tempo de vida da rede. Nota-se, neste gráfico, que a métrica NIAP colaborou na entrega de 6% a mais do que com a métrica ETX na topologia de 10 nós e entregou 26% a mais na topologia de 100 nós. O melhor resultado com a métrica PTR foi a entrega de mais de 21% na topologia de 80 nós. Esses resultados mostram que a NIAP contribuiu para a LLN entregar mais mensagens enquanto os nós intermediários estavam em operação.

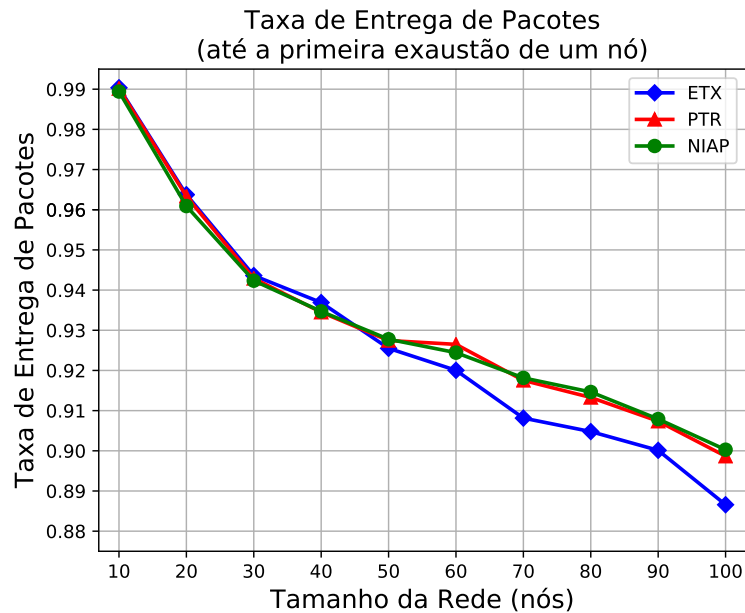
Gráfico 10 – Gráfico do total de pacotes entregues com sucesso para o nó raiz até a primeira exaustão de um nó. Os valores obtidos com a métrica de referência, em ordem de tamanho da rede, são: 4185, 5618, 6592, 7715, 8143, 8885, 9661, 10200, 11154 e 11841 pacotes.



Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 10 considera apenas os pacotes que foram entregues com sucesso, porém é preciso também levar em conta os pacotes perdidos para determinar a confiabilidade. Para tanto, calcula-se a taxa de entrega de pacotes (PDR) que é a razão do total de pacotes recebidos pelo total de pacotes enviados. O Gráfico 11 mostra que as três métricas resultaram em taxas de entregas similares nas topologias de 10 a 50 nós.

Gráfico 11 – Gráfico da taxa de entrega de pacotes até a primeira exaustão de um nó.



Fonte: Autoria própria.

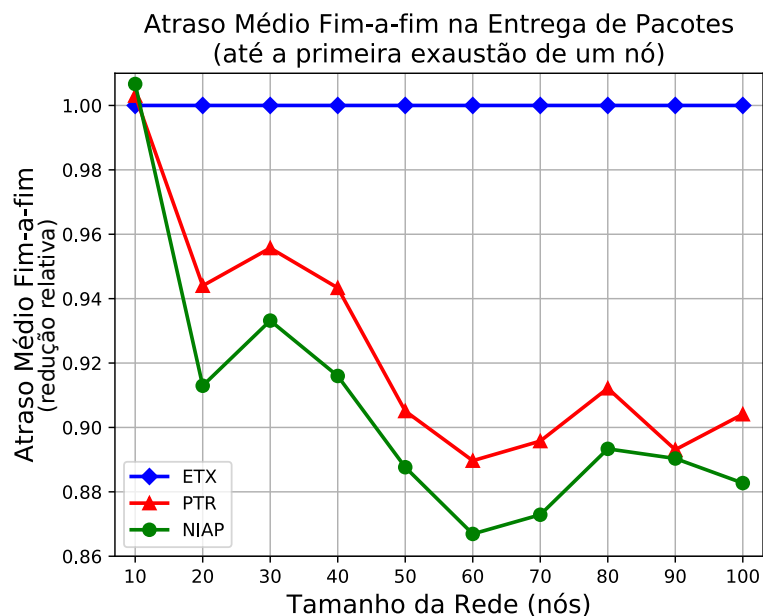
Nas topologias de 60 nós as métricas PTR e NIAP apresentaram uma pequena melhoria. Mas foi nas topologias de 70 a 100 nós que as taxas ficaram em torno de 1% maiores em relação a métrica ETX, com destaque para a métrica NIAP. Nota-se neste gráfico que na medida em que se aumentava a quantidade de nós da topologia, as taxas de entrega reduziram de 99% para abaixo de 90% na topologia de 100 nós. Este gráfico mostra que a métrica NIAP colaborou com as melhores taxas operando por um tempo maior do que as demais. Por fim, pode-se dizer que a NIAP é uma métrica que contribui para reduzir as perdas em uma rede cuja uma de suas principais características é a perda comum de pacotes (LLNs).

4.3.3 Comunicação em Tempo Real

Para calcular o atraso na entrega de pacotes, foram coletados os registros de carimbo de tempo em que os pacotes de dados saíram da aplicação do nó de origem e, também, os registros obtidos quando esses pacotes chegaram ao destino, na aplicação encontrada no nó raiz. A diferença entre o registro de tempo de chegada e o registro de tempo de saída serviu para calcular o atraso fim-a-fim. Considerando apenas os pacotes entregues com sucesso, a média de atraso foi calculada e apresentada no Gráfico 12. Com exceção da topologia de 10 nós, a métrica NIAP colaborou para atrasos menores nas demais topologias, em comparação à métrica ETX esse atraso foi de 6% a menos nas topologias de 30 nós e de 13% a menos nas topologias de 60

nós. A métrica PTR também resultou em baixos atrasos em comparação à métrica ETX, porém em torno de 2% a mais do que com a métrica NIAP (exceto nas topologias de 10 e 90 nós). Além disso, é importante observar que esse atraso médio foi mantido durante o tempo de vida da LLN, mostrando que a NIAP é uma opção que pode atender às aplicações de comunicação em tempo real, uma vez que um baixo atraso é um requisito básico.

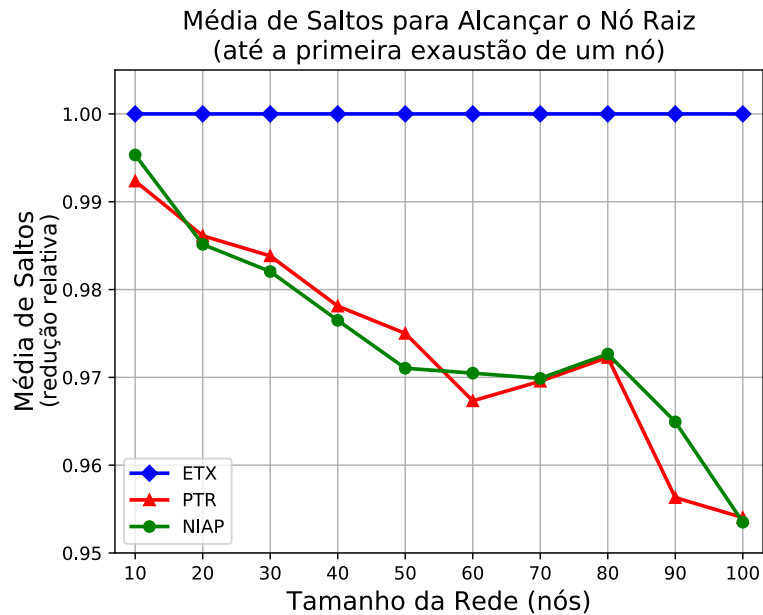
Gráfico 12 – Gráfico do atraso médio fim-a-fim na entrega de pacotes até a primeira exaustão de um nó. Os valores obtidos com a métrica de referência, em ordem de tamanho da rede, são: 0,35, 1,4, 2,5, 3,3, 4,2, 4,7, 5,3, 6, 6,8 e 7,6 segundos.



Fonte: Autoria própria.

Para gerar o Gráfico 13, os registros de pacotes enviados de cada nó foram comparados ao DODAG formado naquele momento, o que permitiu extrair a quantidade média de saltos para um pacote alcançar o nó raiz. A partir das topologias de 30 nós essa média foi de aproximadamente 3 saltos com a métrica ETX. Nota-se, também, que as métricas PTR e NIAP obtiveram resultados similares, a maior diferença entre estas não superou 1%. Ao comparar com a métrica ETX, a NIAP formou DODAGs com 1,4% de saltos a menos nas topologias de 20 nós e 4,6% de saltos a menos nas topologias de 100 nós. Esses resultados mostram que a métrica NIAP reduziu a quantidade de saltos, colaborando com o balanceamento de carga e conseqüente baixa na latência de roteamento.

Gráfico 13 – Gráfico da média de saltos necessários para alcançar o nó raiz até a primeira exaustão de um nó. Os valores obtidos com a métrica de referência, em ordem de tamanho da rede, são: 1,54, 2,6, 3,14, 3,21, 3,33, 3,2, 3,16, 3,15, 3,17 e 3,16 saltos.



Fonte: Autoria própria.

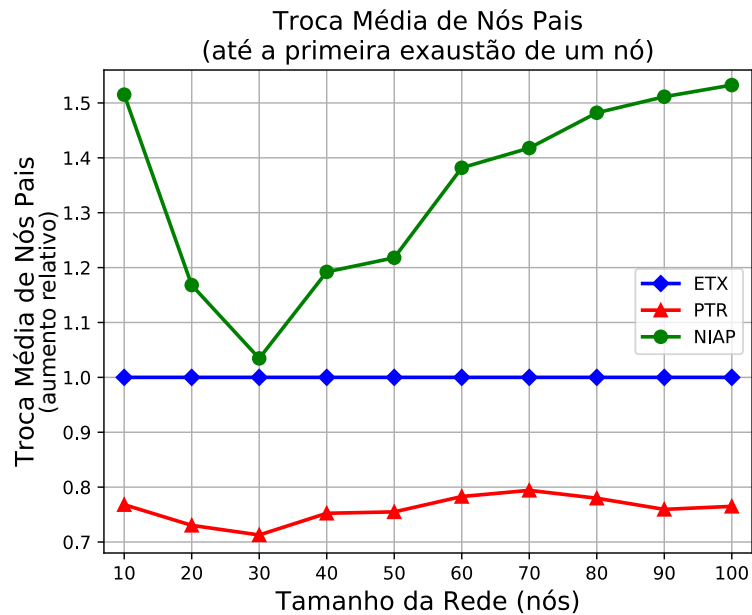
4.3.4 Estabilidade

Durante estes experimentos foi registrado o momento em que cada nó realizava uma troca de nó pai preferido. Assim, a quantidade média de trocas de nós pais, até a primeira exaustão de um nó, pode ser visualizada no último gráfico deste trabalho: Gráfico 14. Nota-se que a métrica NIAP precisou de até 53% de trocas a mais do que foi preciso com a métrica ETX, nas topologias de 100 nós. A métrica PTR, por sua vez, precisou realizar trocas em torno de 25% a menos do que o necessário para a métrica ETX. No que se trata de estabilidade de roteamento, a métrica PTR resultou na melhor contribuição, pois assim que o tráfego de pacotes entre os nós intermediários foi igualado, poucas foram as trocas de nós pais. Por outro lado, a métrica NIAP precisou de uma quantidade maior de trocas para convergir a topologia de roteamento em caminhos que consumiam menos energia e que evitavam domínios com maior probabilidade de colisão, esforço necessário para se obter o melhor balanceamento de carga.

4.3.5 Discussão

O que ficou evidente nestes experimentos foi que a estimativa da potência média de energia dispensada pela interface de rede, como custo de métrica, colaborou para formar

Gráfico 14 – Gráfico da troca média de nós pais até a primeira exaustão de um nó. Os valores obtidos com a métrica de referência, em ordem de tamanho da rede, são: 2,2, 3,76, 4,56, 4,77, 5,35, 5,42, 5,92, 6,47, 7,02 e 7,39 trocas.



Fonte: Autoria própria.

DODAGs com caminhos de menor consumo energético, bem como caminhos que evitaram domínios com maior probabilidade de colisão. Isso resultou em maior tempo de vida da rede e consequente aumento na entrega de pacotes. Além disso, a retransmissão de pacotes impactou no custo de energia da métrica NIAP, como uma retransmissão só ocorre quando há perdas, então evitar caminhos com perdas no enlace resultou na construção de caminhos confiáveis e melhoria na taxa de entrega de pacotes. Assim, a métrica NIAP, além de superar no tempo de vida da rede, superou levemente a métrica ETX na taxa de entrega de pacotes, principalmente em redes maiores e densas. Com relação à melhoria na comunicação em tempo real, é importante destacar que os nós intermediários ficaram sobrecarregados não apenas com o encaminhamento de pacotes, mas também com a quantidade de nós envolvidos no mesmo domínio de colisão. Portanto, a métrica NIAP pouco colaborou com a distribuição do tráfego de pacotes (que é a contribuição da métrica PTR), mas colaborou para a distribuição do consumo de energia, o que permitiu obter melhores resultados em atraso médio fim-a-fim. Ademais, a menor quantidade de saltos com o menor consumo de energia foi a opção escolhida pelos nós no momento de enviar mensagens de dados. Por fim, a métrica NIAP não contribuiu na redução do consumo geral de energia e, ainda, precisou de muitas trocas de nós pais para formar o DODAG, porém, ao comparar os resultados, este foi o esforço necessário para superar a métrica ETX em tempo

de vida da rede, confiabilidade e comunicação em tempo real.

- Sumário:
 - Vantagens da NIAP: a) realiza balanceamento de carga ao evitar nós intermediários sobrecarregados; b) aumenta o tempo de vida da rede mantendo os nós intermediários operando por mais tempo; c) incrementa a confiabilidade na entrega de pacotes ao evitar caminhos em que há maiores domínios de colisão, e d) reduz a latência ao selecionar caminhos com poucos saltos e baixa sobrecarga.
 - Desvantagens da NIAP: a) realiza muitas trocas de nós pais para encontrar os melhores caminhos e, conseqüentemente, b) aumenta o consumo de energia dos nós individualmente (energia gasta eficientemente para aumentar o tempo de vida da rede).

5 CONCLUSÃO

Esta tese apresentou uma nova métrica de roteamento para LLNs, denominada NIAP. Uma métrica baseada na potência média dispensada pela interface de rede para obter caminhos confiáveis e de baixo consumo energético. A métrica NIAP foi implementada e comparada com a métrica ETX (recomendada pela IETF para o roteamento em LLNs) e uma solução recente: a métrica PTR (JI *et al.*, 2018). Foram realizados extensivos experimentos sobre variados cenários, com dezenas a centenas de nós, homogeneidade de *hardware* e nós alimentados por baterias com a mesma carga inicial. A métrica NIAP superou essas métricas em todos os cenários experimentados no que se refere ao tempo de vida da rede (até 24% a mais), maior quantidade de pacotes entregues (até 26% a mais) e no baixo atraso médio fim-a-fim (até 13% a menos). Com relação à taxa de entrega de pacotes, a métrica NIAP obteve resultados levemente melhores do que com a métrica ETX (aproximadamente 1%), quando testada em topologias maiores e densas. Esses resultados foram obtidos porque a métrica NIAP contribuiu ao evitar caminhos sobre domínios com maior probabilidade de colisão, bem como evitou caminhos através de nós localizados em gargalos de tráfego em topologias LLNs. Portanto, a métrica NIAP colabora para estender o tempo de operação dos nós intermediários, postergando a intervenção humana para a troca ou recarga das baterias de dispositivos restritos. Além do mais, em um momento em que a IoT demanda por padrões e protocolos para obter eficiência energética, a NIAP é uma alternativa promissora à ETX como uma métrica de roteamento para LLNs, posto que colabora com o balanceamento de carga e não requer modificações no padrão de operação do RPL.

5.1 DIRECIONAMENTOS

Nesta pesquisa a métrica NIAP foi testada em um cenário específico e comum de ser encontrado na literatura. Porém, em estudos futuros será necessário ampliar esses cenários para posteriores contribuições e aperfeiçoamento da métrica, estes são alguns direcionamentos:

- Realizar experimentos em topologias de larga escala com simuladores compatíveis, visto que topologias maiores que 100 nós, junto ao simulador Cooja, resultaram em prolongados e onerosos experimentos sobre uma plataforma computacional comum. Uma opção é implementar a métrica NIAP no simulador OMNeT++ (OMNET, 2020), pois em um simulador escalável será possível implementar milhares de nós e testar a efetividade da

métrica em topologias com maior sobrecarga de roteamento.

- Realizar experimentos sobre topologias com heterogeneidade de *hardware*, dado que diferentes parâmetros para estimar energia dos dispositivos pode resultar em aprimoramento da métrica;
- Realizar experimentos em ambiente real, posto que a métrica NIAP poderá resultar em eficiência energética mesmo sem a necessidade de monitorar o estado real da bateria;
- Investigar estratégias para reduzir o tempo de escuta na interface de rede, como mostra o gráfico na Figura 3, uma contribuição no ciclo de trabalho de rádio pode reduzir o consumo energético;
- Experimentar outros protocolos de acesso ao meio, como o TSCH (VILAJOSANA *et al.*, 2017), pois a ausência de domínios de colisão poderá impactar nos resultados.

Além do mais, futuros trabalhos poderão dar continuidade aos experimentos com a NIAP, explorando o uso de métrica agregada pelo valor máximo (conforme RFC 6551) e reajuste dos valores de limiares. Modificar a métrica para evitar congestionamentos e atender LLNs com mobilidade dos nós e, ainda, verificar se há contribuição na sua implementação em outros protocolos de roteamento, como o LOADng (CLAUSEN *et al.*, 2016). Por fim, soluções existentes de métricas combinadas poderão ser testadas com a métrica NIAP ao invés da métrica ETX, com a finalidade de melhorar o roteamento e a eficiência energética em LLNs.

REFERÊNCIAS

- ANAMALAMUDI, Satish; ZHANG, Mingui; PERKINS, Charles E.; ANAND, S.V.R; (REMY), Bing Liu. **Asymmetric AODV-P2P-RPL in Low-Power and Lossy Networks (LLNs)**. [S.l.], 2019. Work in Progress. Disponível em: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/draft-ietf-roll-aodv-rpl-07>.
- ARAUJO, Harilton; FILHO, Raimir; RODRIGUES, Joel; RABELO, Ricardo; SOUSA, Natanael; FILHO, José; SOBRAL, José. A Proposal for IoT Dynamic Routes Selection Based on Contextual Information. **Sensors**, MDPI AG, v. 18, n. 2, p. 353, Jan 2018. ISSN 1424-8220. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/s18020353>.
- ASHTON, K. **That Internet of Things Thing**. 2009. Disponível em: <https://www.rfidjournal.com/that-internet-of-things-thing>. Acesso em: 5 de março de 2020.
- BHANDARI, Khadak; HOSEN, A.; CHO, Gi. CoAR: Congestion-Aware Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks for IoT Applications. **Sensors**, MDPI AG, v. 18, n. 11, p. 3838, Nov 2018. ISSN 1424-8220. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/s18113838>.
- BORMANN, Carsten; ERSUE, Mehmet; KERÄNEN, Ari. **Terminology for Constrained-Node Networks**. RFC Editor, 2014. RFC 7228. (Request for Comments, 7228). Disponível em: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc7228.txt>.
- BORMANN, Carsten; VASSEUR, JP; SHELBY, Zack. **The Internet of Things**. 2010. Disponível em: <https://www.ietfjournal.org/the-internet-of-things/>. Acesso em: 5 de março de 2020.
- BOUAZIZ, Maha; RACHEDI, Abderrezak; BELGHITH, Abdelfettah. EKF-MRPL: Advanced mobility support routing protocol for internet of mobile things: Movement prediction approach. **Future Generation Computer Systems**, v. 93, p. 822–832, 2019. ISSN 0167-739X. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X17306805>.
- BRANDT, Anders; BURON, Jakob; PORCU, Giorgio. **Home Automation Routing Requirements in Low-Power and Lossy Networks**. RFC Editor, 2010. RFC 5826. (Request for Comments, 5826). Disponível em: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc5826.txt>.
- CAM-WINGET, Nancy; HUI, Jonathan; POPA, Daniel. **Applicability Statement for the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL) in Advanced Metering Infrastructure (AMI) Networks**. RFC Editor, 2017. RFC 8036. (Request for Comments, 8036). Disponível em: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc8036.txt>.

CLAUSEN, Thomas H.; VERDIERE, Axel Coli; YI, Jiazi; NIKTASH, Afshin; IGARASHI, Yuichi; SATOH, Hiroki; HERBERG, Ulrich; LAVENU, Cedric; LYS, Thierry; DEAN, Justin. **The Lightweight On-demand Ad hoc Distance-vector Routing Protocol - Next Generation (LOADng)**. [S.l.], 2016. Work in Progress. Disponível em: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/draft-clausen-lln-loadng-15>.

CONTIKI. **Contiki: The Open Source OS for the Internet of Things**. 2020. Disponível em: <http://www.contiki-os.org>. Acesso em: 5 de março de 2020.

COUTO, Douglas S. J. De; AGUAYO, Daniel; BICKET, John; MORRIS, Robert. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. *In: Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2003. (MobiCom '03), p. 134–146. ISBN 1581137532. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/938985.939000>.

CULLER, David; HUI, Jonathan; VASSEUR, JP; MANRAL, Vishwas. **An IPv6 Routing Header for Source Routes with the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL)**. RFC Editor, 2012. RFC 6554. (Request for Comments, 6554). Disponível em: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc6554.txt>.

DEMICHELI, Fabio. **Design, Implementation and Evaluation of an Energy Efficient RPL Routing Metric**. 2012. Tese (Doutorado) — Dept. Inf. Eng, Parma Univ, Italy, 2012.

DOHLER, Mischa; WATTEYNE, Thomas; WINTER, Tim; BARTHEL, Dominique. **Routing Requirements for Urban Low-Power and Lossy Networks**. RFC Editor, 2009. RFC 5548. (Request for Comments, 5548). Disponível em: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc5548.txt>.

DUNKELS, Adam. **The ContikiMAC Radio Duty Cycling Protocol**. 2011. Disponível em: <http://dunkels.com/adam/dunkels11contikimac.pdf>. Acesso em: 5 de março de 2020.

DUNKELS, Adam; OSTERLIND, Fredrik; TSIFTES, Nicolas; HE, Zhitao. Software-Based on-Line Energy Estimation for Sensor Nodes. *In: Proceedings of the 4th Workshop on Embedded Networked Sensors*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2007. (EmNets '07), p. 28–32. ISBN 9781595936943. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/1278972.1278979>.

DUQUENNOY, Simon; ERIKSSON, Joakim; VOIGT, Thiemo. Five-Nines Reliable Downward Routing in RPL. *In: Arxiv*. [S.l.: s.n.], 2017.

ENERGIZER. **DataSheet - Energizer E91 - IEC-LR6/ANSI-15A**. 2020. Disponível em: <http://data.energizer.com/PDFs/E91.pdf>. Acesso em: 5 de março de 2020.

GNAWALI, Omprakash; LEVIS, P. **The Minimum Rank with Hysteresis Objective Function**. RFC Editor, 2012. RFC 6719. (Request for Comments, 6719). Disponível em: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc6719.txt>.

GOMEZ, Carles; KOVATSCH, Matthias; TIAN, Hui; CAO, Zhen. **Energy-Efficient Features of Internet of Things Protocols**. RFC Editor, 2018. RFC 8352. (Request for Comments, 8352). Disponível em: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc8352.txt>.

GOYAL, Mukul; BACCELLI, Emmanuel; PHILIPP, Matthias; BRANDT, Anders; MARTOCCI, Jerry. **Reactive Discovery of Point-to-Point Routes in Low-Power and Lossy Networks**. RFC Editor, 2013. RFC 6997. (Request for Comments, 6997). Disponível em: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc6997.txt>.

HUI, Jonathan; KELSEY, Richard. **Multicast Protocol for Low-Power and Lossy Networks (MPL)**. RFC Editor, 2016. RFC 7731. (Request for Comments, 7731). Disponível em: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc7731.txt>.

IEEE. IEEE Approved Draft Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). **IEEE P802.15.4-REVc/D01, October 2015**, p. 1–702, 2015. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7339650>. Acesso em: 5 de março de 2020.

IOVA, Oana; THEOLEYRE, Fabrice; NOEL, Thomas. Using Multiparent Routing in RPL to Increase the Stability and the Lifetime of the Network. **Ad Hoc Networks**, v. 29, p. 45–62, 2015. ISSN 1570-8705. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870515000311>.

JI, C.; KOUTSIAMANIS, R.; MONTAVONT, N.; CHATZIMISIOS, P.; DUJOVNE, D.; PAPADOPOULOS, G. Z. TAOF: Traffic Aware Objective Function for RPL-based Networks. *In: 2018 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–5.

KAMGUEU, P.; NATAF, E.; DJOTIO, T. Ndie. On Design and Deployment of Fuzzy-based Metric for Routing in Low-power and Lossy Networks. *In: 2015 IEEE 40th Local Computer Networks Conference Workshops (LCN Workshops)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 789–795.

KAMGUEU, Patrick Olivier; NATAF, Emmanuel; NDIÉ, Thomas Djotio; FESTOR, Olivier. **Energy-based Routing Metric for RPL**. [S.l.], 2013. 14 p. Disponível em: <https://hal.inria.fr/hal-00779519>.

KHALLEF, W.; MOLNAR, M.; BENSLIMANE, A.; DURAND, S. Multiple Constrained QoS Routing with RPL. *In: 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.

KIM, H.; KO, J.; CULLER, D. E.; PAEK, J. Challenging the IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL): A Survey. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 19, n. 4, p. 2502–2525, 2017.

KO, Jeonggil; JEONG, Jongsoo; PARK, Jongjun; JUN, Jong Arm; GNAWALI, Omprakash; PAEK, Jeongyeup. DualMOP-RPL: Supporting Multiple Modes of Downward Routing in a Single RPL Network. **ACM Trans. Sen. Netw.**, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 11, n. 2, mar. 2015. ISSN 1550-4859. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/2700261>.

KOUTSIAMANIS, Remous-Aris; PAPADOPOULOS, Georgios; SANCHEZ, Eduardo Ingles; JI, Chenyang; DUJOVNE, Diego; MONTAVONT, Nicolas. **Traffic-aware Objective Function**. [S.l.], 2019. Work in Progress. Disponível em: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/draft-koutsiamanis-roll-traffic-aware-of-00>.

KUSHALNAGAR, Nandakishore; MONTENEGRO, Gabriel; SCHUMACHER, Christian. **IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals**. RFC Editor, 2007. RFC 4919. (Request for Comments, 4919). Disponível em: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc4919.txt>.

LAMAAZI, Hanane; BENAMAR, Nabil. OF-EC: A Novel Energy Consumption Aware Objective Function for RPL based on Fuzzy Logic. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 117, p. 42–58, 2018. ISSN 1084-8045. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804518301838>.

LAMAAZI, Hanane; BENAMAR, Nabil. A Comprehensive Survey on Enhancements and Limitations of the RPL Protocol: A Focus on the Objective Function. **Ad Hoc Networks**, v. 96, p. 102001, 2020. ISSN 1570-8705. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870519300319>.

LEVIS, P; CLAUSEN, Thomas H.; HUI, Jonathan; GNAWALI, Omprakash; KO, JeongGil. **The Trickle Algorithm**. RFC Editor, 2011. RFC 6206. (Request for Comments, 6206). Disponível em: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc6206.txt>.

LIM, Chansook. A Survey on Congestion Control for RPL-Based Wireless Sensor Networks. **Sensors**, v. 19, n. 11, p. 2567, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s19112567>.

LORENTE, Guillermo Gastón; LEMMENS, Bart; CARLIER, Matthias; BRAEKEN, An; STEENHAUT, Kris. BMRP: Bidirectional Multicast RPL Forwarding. **Ad Hoc Networks**, v. 54, p. 69–84, 2017. ISSN 1570-8705. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870516302815>.

MARTOCCI, Jerry; MIL, Pieter; RIOU, Nicolas; VERMEYLEN, Wouter. **Building Automation Routing Requirements in Low-Power and Lossy Networks**. RFC Editor, 2010. RFC 5867. (Request for Comments, 5867). Disponível em: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc5867.txt>.

MEMSIC. **TelosB Mote Platform**. 2020. Disponível em: http://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/WSN/telosb_datasheet.pdf. Acesso em: 27 de julho de 2019.

MORIN, É.; MAMAN, M.; GUIZZETTI, R.; DUDA, A. Comparison of the Device Lifetime in Wireless Networks for the Internet of Things. **IEEE Access**, v. 5, p. 7097–7114, 2017.

NORDIC. **Nordic Semiconductor. nRF52840 Advanced multi-protocol System-on-Chip Supporting: Bluetooth low energy (Bluetooth 5), ANT/ANT+, 802.15.4 and 2.4GHz proprietary**. 2020. Disponível em: http://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF52840_PB_v1.0.pdf. Acesso em: 30 de março de 2019.

NXP. **NXP Semiconductors. MCR20AVHM Data Sheet Low power, high-performance 2.4 GHz IEEE 802.15.4 compliant transceiver with connectivity**. 2020. Disponível em: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MCR20AVHM.pdf>. Acesso em: 30 de março de 2019.

OMALE, Gloria. **Gartner Identifies Top 10 Strategic IoT Technologies and Trends**. 2018. Disponível em: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2018-11-07-gartner-identifies-top-10-strategic-iot-technologies-and-trends>. Acesso em: 5 de março de 2020.

OMNET. **OMNeT++ Discrete Event Simulator**. 2020. Disponível em: <https://omnetpp.org/>. Acesso em: 5 de março de 2020.

PALATTELLA, M. R.; ACCETTURA, N.; VILAJOSANA, X.; WATTEYNE, T.; GRIECO, L. A.; BOGGIA, G.; DOHLER, M. Standardized Protocol Stack for the Internet of (Important) Things. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 15, n. 3, p. 1389–1406, 2013.

PEREIRA, Hermano; MORITZ, Guilherme Luiz; FONSECA, Mauro. Uma Métrica de Roteamento com Eficiência Energética para o RPL da Internet das Coisas. *In: Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2019. p. 224–237. ISSN 2177-9384. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/7362>.

PEREIRA, H.; MORITZ, G. L.; SOUZA, R. D.; MUNARETTO, A.; FONSECA, M. Increased Network Lifetime and Load Balancing based on Network Interface Average Power Metric for RPL. **IEEE Access**, v. 8, p. 48686–48696, 2020.

PISTER, Kris; THUBERT, Pascal; DWARS, Sicco; PHINNEY, Tom. **Industrial Routing Requirements in Low-Power and Lossy Networks**. RFC Editor, 2009. RFC 5673. (Request for Comments, 5673). Disponível em: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc5673.txt>.

QASEM, M.; AL-DUBAI, A.; ROMDHANI, I.; GHALEB, B.; GHARIBI, W. A New Efficient Objective Function for Routing in Internet of Things Paradigm. *In: 2016 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.

QASEM, Mamoun; AL-DUBAI, Ahmed; ROMDHANI, Imed; GHALEB, Baraq; HOU, Jianqiang; JADHAV, RAHUL ARVIND. **Load Balancing Objective Function in RPL**. [S.l.], 2017. Work in Progress. Disponível em: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/draft-qasem-roll-rpl-load-balancing-02>.

QASEM, M.; ALTAWSSI, H.; YASSIEN, M. B.; AL-DUBAI, A. Performance Evaluation of RPL Objective Functions. *In: 2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1606–1613.

SANMARTIN, Paul; ROJAS, Aldo; FERNANDEZ, Luis; AVILA, Karen; JABBA, Daladier; VALLE, Sebastian. Sigma Routing Metric for RPL Protocol. *Sensors*, MDPI AG, v. 18, n. 4, p. 1277, Apr 2018. ISSN 1424-8220. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/s18041277>.

SOBRAL, J. S.; RODRIGUES, J. R.; RABELO, R.; AL-MUHTADI, J. M.; KOROTAIEV, V. Routing Protocols for Low Power and Lossy Networks in Internet of Things Applications. *Sensors*, v. 19, n. 9, p. 2144–2144, May 2019. ISSN 1424-3210.

TAGHIZADEH, S.; BOBARSHAD, H.; ELBIAZE, H. CLRPL: Context-Aware and Load Balancing RPL for Iot Networks Under Heavy and Highly Dynamic Load. *IEEE Access*, v. 6, p. 23277–23291, 2018.

TAHIR, Y.; YANG, S.; MCCANN, J. BRPL: Backpressure RPL for High-Throughput and Mobile IoTs. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, v. 17, n. 1, p. 29–43, 2018.

TAN, J.; KOO, S. G. M. A Survey of Technologies in Internet of Things. *In: 2014 IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 269–274.

TANG, Weisheng; MA, Xiaoyuan; HUANG, Jun; WEI, Jianming. Toward Improved RPL: A Congestion Avoidance Multipath Routing Protocol with Time Factor for Wireless Sensor Networks. *J. Sensors*, v. 2016, p. 8128651:1–8128651:11, 2016.

TEXAS. **CC2420 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / Zigbee-ready RF Transceiver**. 2020. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>. Acesso em: 27 de julho de 2019.

TEXAS. **MSP430F15x, MSP430F16x, MSP430F161x Mixed Signal Microcontroller**. 2020. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f1611.pdf>. Acesso em: 27 de julho de 2019.

TEXAS. Texas Instruments. **CC2538 Powerful Wireless Microcontroller System-On-Chip for 2.4-GHz IEEE 802.15.4, 6LoWPAN, and ZigBee Applications**. 2020. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2538.pdf>. Acesso em: 5 de março de 2020.

THUBERT, Pascal. **Objective Function Zero for the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL)**. RFC Editor, 2012. RFC 6552. (Request for Comments, 6552). Disponível em: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc6552.txt>.

TRIPATHI, Joydeep; OLIVEIRA, Jaudelice C. de; VASSEUR, JP. **Performance Evaluation of the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL)**. RFC Editor, 2012. RFC 6687. (Request for Comments, 6687). Disponível em: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc6687.txt>.

ULLAH, R.; FAHEEM, Y.; KIM, B. Energy and Congestion-Aware Routing Metric for Smart Grid AMI Networks in Smart City. **IEEE Access**, v. 5, p. 13799–13810, 2017.

VASSEUR, JP. **Terms Used in Routing for Low-Power and Lossy Networks**. RFC Editor, 2014. RFC 7102. (Request for Comments, 7102). Disponível em: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc7102.txt>.

VASSEUR, JP; KIM, Mijeom; PISTER, Kris; DEJEAN, Nicolas; BARTHEL, Dominique. **Routing Metrics Used for Path Calculation in Low-Power and Lossy Networks**. RFC Editor, 2012. RFC 6551. (Request for Comments, 6551). Disponível em: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc6551.txt>.

VILAJOSANA, Xavier; PISTER, Kris; WATTEYNE, Thomas. **Minimal IPv6 over the TSCH Mode of IEEE 802.15.4e (6TiSCH) Configuration**. RFC Editor, 2017. RFC 8180. (Request for Comments, 8180). Disponível em: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc8180.txt>.

WINTER, Tim; THUBERT, Pascal; BRANDT, Anders; HUI, Jonathan; KELSEY, Richard; LEVIS, P; PISTER, Kris; STRUIK, Rene; VASSEUR, JP; ALEXANDER, Roger. **RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks**. RFC Editor, 2012. RFC 6550. (Request for Comments, 6550). Disponível em: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc6550.txt>.

XIAO, W.; LIU, J.; JIANG, N.; SHI, H. An Optimization of the Object Function for Routing Protocol of Low-power and Lossy Networks. *In: The 2014 2nd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI 2014)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 515–519.

YASSEIN, Muneer Bani; FLEFIL, Ameena; KRSTIC, Dragana; KHAMAYSEH, Yaser; MARDINI, Wail; SHATNAWI, Mohammed. Performance Evaluation of RPL in High Density Networks for Internet of Things (IoT). *In: Proceedings of the 2019 8th International Conference on Software and Information Engineering*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2019. (ICSIE '19), p. 183–187. ISBN 9781450361057. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3328833.3328883>.

YI, J.; CLAUSEN, T.; IGARASHI, Y. Evaluation of Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks: LOADng and RPL. *In: 2013 IEEE Conference on Wireless Sensor (ICWISE)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 19–24.

ZHU, Licai; WANG, Ruchuan; YANG, Hao. Multi-Path Data Distribution Mechanism Based on RPL for Energy Consumption and Time Delay. *Information*, MDPI AG, v. 8, n. 4, p. 124, Oct 2017. ISSN 2078-2489. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/info8040124>.