

# Avaliação de Métricas de Desempenho da Rede no Sistema Wi-SUN FAN usando Simulador Cooja

Ananías Ambrosio, Rodrigo J. Riella, Luciana M. Iantorno, Evelio M. G. Fernández

**Resumo**— *Wireless Smart Ubiquitous Network Field Area Network (Wi-SUN FAN) é um perfil que faz parte da aliança Wi-SUN que desenvolve especificações para redes de área de campo, suportando Low Power and Lossy Networks (LLNs). O perfil Wi-SUN FAN fornece serviços de transporte baseados em IPv6 e adota o protocolo IPv6 Routing Protocol for LLNs (RPL) para formação e roteamento de pacotes, o qual trabalha na camada de rede. O RPL permite inicialmente a construção da rede antes do envio dos pacotes de dados dentro da rede FAN, utilizando várias métricas para determinar o custo do caminho que conectará os nós uns com os outros. Neste estudo, o RPL foi configurado com os parâmetros definidos pelo Wi-SUN FAN. A simulação foi realizada em três cenários com diferentes posicionamentos de nós, utilizando o simulador Cooja. Para avaliação da rede, foram analisados o tempo de convergência da rede, sobrecarga de tráfego em referência das mensagens de controle do RPL, latência da rede e taxa de entrega de pacotes para cada cenário.*

**Palavras-Chave** — *Wi-SUN FAN, RPL, LLN, COOJA.*

**Abstract**— *Wireless Smart Ubiquitous Network Field Area Network (Wi-SUN FAN) is a profile that is part of the Wi-SUN alliance that develops specifications for field area networks, supporting Low Power and Lossy Networks (LLNs). The Wi-SUN FAN profile provides IPv6-based transport services and adopts IPv6 Routing Protocol for LLNs (RPL) for packet routing and training, which works at the network layer. The RPL initially allows the network to be built before sending the data packets into the FAN network, using several metrics to determine the cost of the path that will connect the nodes to each other. In this study, the RPL was configured with the parameters defined by Wi-SUN FAN. The simulation was performed in three scenarios with different node positions, using the Cooja simulator. For network evaluation, network convergence time, traffic overload in reference of RPL control messages, network latency and packet delivery ratio were analyzed for each scenario.*

**Keywords** — *Wi-SUN FAN, RPL, LLN, COOJA.*

## I. INTRODUÇÃO

À medida que mais produtos e aparelhos são conectados, e conforme crescem as capacidades analíticas, novas aplicações no campo de Internet das Coisas (IoT) vão surgir. As redes de sensores sem fio são uma boa opção para a interconexão de diferentes dispositivos dos serviços que se fornecem na atualidade. A aliança Wi-SUN [1] procura promover padrões certificados para diferentes sistemas de redes sem fio, que permitam o desenvolvimento de projetos relacionados com redes de comunicação sem fio para serviços públicos, cidades inteligentes e IoT. Um dos perfis desenvolvidos é Wi-SUN FAN [2], o qual define especificações para redes de área de campo, suportando LLNs. Na camada de rede, o perfil FAN é baseado no protocolo IPv6 com adaptação *IPv6 over Low-*

*Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPAN)*. Para a formação da rede adota-se a função RPL, a qual permite inicialmente a construção da rede mediante mensagens de controle usando ICMPv6. O RPL utiliza diversas métricas para melhorar o desempenho de transmissão e determinar o custo de caminho que permitirá conectar os nós uns com os outros. O perfil Wi-SUN FAN foi projetado para suportar redes com alta densidade de nós e já tem especificações definidas para a escala da rede. Para isso, é importante a avaliação das mensagens de controle trocadas entre os nós de acordo com as suas especificações.

Estudos prévios de avaliação de desempenho do RPL, têm realizado comparações baseadas nas funções objetivo ETX e OF0 em cenários com nós distribuídos de forma aleatória. Em [3], uma avaliação de desempenho é realizada considerando-se uma mesma quantidade de nós distribuídos de forma aleatória onde o parâmetro  $DIO_{min}$  é modificado. Já em [4] a avaliação é feita modificando-se uma rede com topologia mais densa do tipo grades fixas e aleatórias e considerando três diferentes quantidades de nós para cada cenário.

Visando uma abordagem diferente, neste trabalho realizou-se a configuração do RPL para uma escala de rede menor, dirigido ao padrão Wi-SUN FAN, para ter os nós com profundidades definidas, que permitam ter uma avaliação inicial da formação da rede com o padrão Wi-SUN FAN, e que servirá de referência para avaliações reais, como se pode verificar em estudos de outras tecnologias sem fio, que utilizam redes menores para diferentes aplicações [5] [6]. Utilizou-se o simulador Cooja já que é um simulador flexível projetado para simular redes de sensores que se executa no sistema operacional Contiki, que é de código aberto e portátil, portanto, fácil para controlar os parâmetros da rede RPL [7]. Foram estudados três cenários com diferentes posicionamentos de nós, para avaliar o tempo de convergência da rede e a sobrecarga de tráfego com relação às mensagens de controle que são geradas. Esta informação ajuda na definição do tempo necessário para a formação da rede e o tempo para início de envio do primeiro pacote de dados dentro da rede. Além disso, o tempo de latência da rede e a taxa de entrega de pacotes também são avaliados para cada cenário.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: além desta seção I introdutório, a seção II descreve os fundamentos teóricos sobre Wi-SUN FAN e o padrão RPL; na seção III é apresentado o modelo e cenários da simulação, assim como as métricas de desempenho; na seção IV são apresentadas as especificações do RPL de Wi-SUN FAN para o simulador Cooja; na seção V são apresentados os resultados de acordo as

Ananías Ambrosio, Rodrigo J. Riella e Evelio M. G. Fernández, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. E-mails: ananiasambrosio@ufpr.br, riella@ufpr.br, evelio@ufpr.br. Rodrigo J. Riella e Luciana M. Iantorno, Institutos Lactec. E-mails: riella@lactec.org.br, luciana.iantorno@lactec.org.br. Este trabalho foi financiado pelo projeto PD 0047 0080/2017 do programa de P&D Aneel do grupo Neoenergia.

métricas de desempenho e na última seção VI são apresentadas as conclusões finais.

## II. WI-SUN FAN

As especificações do perfil Wi-SUN FAN são baseadas em vários protocolos do IETF, IEEE e ANSI/TIA [8], [9], suportando LLN's. As especificações FAN fornecem serviços de transporte baseados em IPv6 para UDP e TCP. A Figura 1 apresenta a pilha do perfil Wi-SUN FAN, comparada com o modelo OSI. A camada física é baseada nos padrões IEEE802.15.4, e .4g, que fornece comunicação bidirecional com alta taxa de dados (até 300 Kbps) e baixa latência. A subcamada MAC baseia-se no IEEE 802.15.4e, com extensões de informações (IEs) que são definidas pelo Wi-SUN FAN. A camada de rede é IPv6 com adaptação 6LoWPAN [10]. O Wi-SUN FAN oferece suporte a topologias estrela e *mesh*, assim como implementações híbridas de estrela/*mesh*. A camada de transporte fornece serviços UDP e TCP. Em termos de segurança, o controle de acesso está baseado no padrão IEEE802.1X e EAP-TLS.

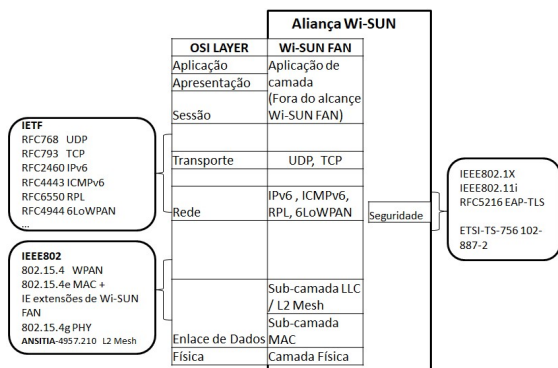


Figura 1. Pilha do perfil Wi-SUN FAN com referências [2].

### A. Camada de rede

A especificação Wi-SUN FAN define dois métodos possíveis para roteamento de pacotes IPv6: RPL obrigatório na camada de rede e *Multi-Hop Delivery Service* (MHDS) opcional na camada de enlace de dados [11]. Como a rede pode operar apenas com um dos métodos, este estudo está dirigido para o primeiro método indicado.

O perfil Wi-SUN FAN, assim como outras tecnologias, classifica os dispositivos de acordo com a sua função dentro da rede, classificando-os em três modos [12]: (a) Roteador de Borda, que é o nó que permite a interconexão com a rede *Wide Area Network* (WAN). Cada *Personal Area Networks* (PAN) contém um Roteador de Borda que mantém todas as informações de roteamento de origem para os outros nós. (b) Roteador, que é o nó que fornece o encaminhamento de pacotes para cima e para baixo e mantém as tabelas de roteamento para seus nós vizinhos. (c) Folha, que é o nó que fornece as capacidades mínimas de descobrir e entrar no PAN, enviar e receber pacotes.

No roteamento na camada de rede, que contém um ou mais PANs, os dispositivos da rede assumem uma das três funções indicadas. Na Figura 2 ilustra-se um exemplo de roteamento na camada de rede perfil FAN.

### B. Padrão RPL

No RPL [13] a rede é organizada em forma de grafos criando uma topologia chamada *Direct Acyclic Graph* (DAG), composto por um ou mais nós raízes ou Roteador de Borda que atuam como nós de drenagem ou Roteadores, onde a partir

deles, os grafos serão divididos em nós filhos ou Folha que se comunicarão com o nó raiz através de mensagens *Destination Oriented DAGs* (DODAG).

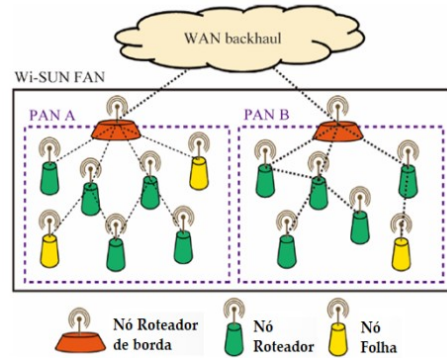


Figura 2. Exemplo de roteamento na camada de rede FAN [12].

### 1. Mensagens de controle RPL:

Para criar o grafo de topologia DODAG, o RPL usa as seguintes mensagens de controle:

(a) *DODAG Information Solicitation (DIS)*: são emitidas por nós que desejam conectar-se a uma rede para solicitar a mensagem DIO de um nó RPL.

(b) *DODAG Information Object (DIO)*: é o portador de informações sobre a instância RPL e suas configurações.

(c) *Objeto de Anúncio de Destino (DAO)*: é usado para propagar as informações sobre o destino para os nós ascendentes.

### 2. Formação de DODAG:

Para a formação de um grafo RPL deve construir-se o DODAG seguindo o processo seguinte:

(a) Escolha dos nós que serão configurados como raízes DODAG e possuirão a configuração DODAG.

(b) Esses nós devem anunciar sua configuração, sua afiliação a um DODAG e seu custo de roteamento por meio da difusão de mensagens DIO. As informações mínimas que uma mensagem DIO deve transmitir são as seguintes:

**RPLInstanceID**, é um identificador exclusivo para uma instância RPL que identifica um ou mais DODAGs. Uma rede pode ser formada por múltiplas instâncias onde cada uma delas identifica um DODAG e terá definido sua própria Função Objetivo (OF). O conjunto de DODAGs identificado por um *RPLInstanceID* é conhecido como *RPLInstance* e todos os DODAGs da mesma instância RPL terão o mesmo OF.

**DODAGID**, este parâmetro é uma instância RPL na qual a combinação de *RPLInstanceID* e *DODAGID* identifica exclusivamente um DODAG dentro da rede. Uma instância RPL pode conter vários DODAGs, nos quais cada um tem seu próprio ID.

**DODAG Version Number**, é um parâmetro usado pelo nó raiz para reconstruir o DODAG.

**Rank**, permite conhecer a posição de cada nó em relação ao DODAG raiz ou ao nó raiz, para que seu valor aumente se ele se mover do nó raiz para os nós filhos. Essa classificação é calculada a partir de uma Função Objetivo (OF), que usa uma métrica para determinar a conveniência do nó, por exemplo, para escolher o próximo melhor salto para alcançar o nó raiz e minimizar seu gasto de energia.

(c) Para iniciar a formação do DODAG, o nó raiz envia os DIOs do tipo broadcast aos seus vizinhos, sendo o único capaz de realizar este processo e nenhum outro nó poderá fazê-lo, como é ilustrado na Figura 3 (I). Durante este processo de disseminação da mensagem, os campos *RPLInstanceID* e *DODAGID* permanecerão inalterados durante a formação da topologia, enquanto o único campo que será alterado cada vez que uma mensagem DIO atravessa a rede, será o *rank*.

Quando um nó na rede recebe a mensagem DIO, ele mantém um conjunto de nós vizinhos candidatos escolhendo aqueles que têm um valor de *rank* igual ou menor do que o dele, de modo que eles se tornem "nós pais". Se houver mais de um "nó pai", um deles será escolhido com base no OF, permitindo que o próximo salto seja atribuído para rotear os dados para o nó raiz.

Cada entrada na tabela de roteamento dos nós registra os destinos especificados de acordo com a mensagem DIO, bem como o pai DODAG da versão DODAG. Os nós que decidem aderir a este DODAG devem escolher um ou mais pais do DODAG como próximos saltos para a rota padrão daquela instância. Uma vez calculada o *rank* de um nó, ela propaga a mensagem DIO atualizada para o restante de seus vizinhos, como é ilustrado na Figura 3 (II). Este processo é repetido até a construção completa da topologia DAG, como se mostra na Figura 3 (III e IV).

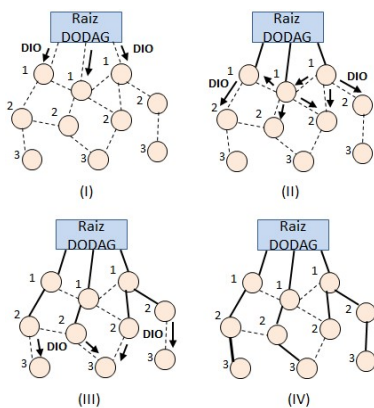


Figura 3. Formação de grafo DODAG

Após a formação do DODAG, cada nó deve selecionar um nó pai ou nós pais de todos os seus vizinhos e calcular a sua própria posição, cujo valor deve ser maior do que os nós pai para evitar um looping ao realizar o roteamento.

### 3. Função Objetivo (OF):

Cada nó da rede RPL deve ser definido por uma Função Objetivo (OF) que permite selecionar e otimizar as rotas dentro de uma instância RPL. A OF é identificada pelo *Objective Code Point* (OCP), que é parte da configuração de uma mensagem DIO, e permite calcular quais rotas são mais vantajosas para um nó. Com isso, se inicia o processo de *rank* e assim ocorrem as escolhas dos nós pais de cada roteador, e por fim o nó raiz daquela instancia RPL.

A OF está baseada em um conjunto de métricas, e são usadas nos métodos de roteamento para permitir encontrar o melhor caminho até o seu destino, ou seja, aquele com menor custo baseados nas regras da mesma. Em Wi-SUN FAN usa o método de roteamento de *Minimum Rank with Hysteresis Objective Function* (MRHOF) como OF, onde *Expected Transmission Count* (ETX) é adotado como a métrica de roteamento para calcular o valor do *rank*.

## III. MODELO DE SIMULAÇÃO

Para a simulação, utilizou-se a ferramenta Cooja para construir uma simulação em Contiki-NG [14] tomando como modelo o padrão Wi-SUN FAN. Para isto, geraram-se dois tipos de scripts, chamados *rpl-udp* e *rpl-border-router*; (i) *rpl-udp*, configura o nó no modo Roteador e (ii) *rpl-border-router*, configura o nó no modo Roteador de Borda. Este script utiliza o padrão 6LoWPAN o qual permite que os dispositivos comuniquem-se tanto dentro da rede como com outros sistemas externos. A Figura 4 mostra a localização do Roteador de Borda e do Roteador.



Figura 4. Localização dos nós Roteador de Borda e Roteador [14].

### A. Cenários de simulação

Para a simulação foram definidos três cenários distintos, todos contendo apenas um Roteador de Borda. Os cenários foram escolhidos para possibilitar a comparação dos dados de topologias diferentes utilizando o mesmo número de nós. Além disso, os cenários escolhidos possibilitarão uma análise comparativa dos dados simulados com dados de uma rede Wi-SUN real.

*Cenário I:* Este cenário considera um sistema no qual apenas um roteador se conecta diretamente ao Roteador de Borda e os nós finais conectam-se a esse roteador. Na primeira simulação apenas um nó foi conectado ao roteador, e em cada simulação subsequente acresceu-se um novo nó final à rede. Esse cenário está ilustrado na Figura 5 (Ia, Ib e Ic).

*Cenário II:* Neste cenário definiu-se um conjunto roteador/nó final, no qual cada nó final está conectado ao seu roteador e o roteador está conectado diretamente ao Roteador de Borda. A primeira simulação foi realizada apenas com um conjunto roteador/nó final e para cada simulação subsequente um novo conjunto foi adicionado ao sistema. Esse cenário está ilustrado na Figura 5 (IIb e IIc).

*Cenário III:* Neste cenário foi utilizado o mesmo conjunto roteador/nó final utilizado no segundo cenário, porém, apenas o primeiro roteador foi conectado ao Roteador de Borda e em cada nova simulação o novo roteador foi conectado ao roteador da simulação anterior. Esse cenário está apresentado na Figura 5 (IIIb e IIIc).

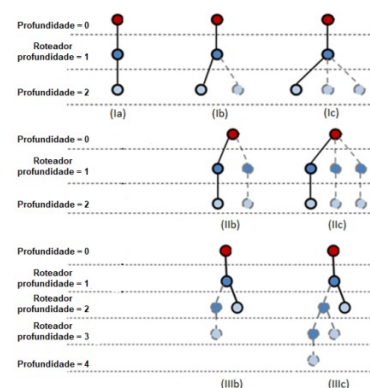


Figura 5. Cenários da simulação.



### B. Medição das métricas de desempenho

Quatro métricas de desempenho para a avaliação dos resultados das simulações foram utilizadas: o tempo de convergência da rede, sobrecarga do controle de tráfego, latência da rede e taxa de entrega de pacotes [3].

#### (a) Tempo de convergência da rede

Realizou-se a simulação com os diferentes cenários propostos com o objetivo de obter o tempo de convergência da rede RPL com parametrização Wi-SUN FAN. A medição desse parâmetro inicia no momento que a raiz envia a primeira mensagem de controle e termina quando os nós estão disponíveis na tabela de roteamento da raiz. Para o caso da rede Wi-SUN FAN, o tempo de convergência  $T_c$ , conforme a equação (1), inicia quando o Roteador de Borda envia a primeira mensagem DIO no tempo  $m$  e termina quando o último DIO se junta ao DAG no tempo  $n$ :

$$T_c = n - m. \quad (1)$$

#### (b) Sobrecarga do controle de tráfego

Para calcular a sobrecarga do controle de tráfego  $St$ , conforme a equação (2), cada nó imprimirá a mensagem DIO / DIS / DAO enviada, dependendo do tipo de mensagem de controle. Coletam-se essas mensagens de controle por base de nós e somam-se para se obter a sobrecarga total de controle de rede RPL.

$$St = \sum_{k=1}^p DIO(k) + \sum_{k=1}^q DIS(k) + \sum_{k=1}^r DAO(k), \quad (2)$$

onde  $p$ ,  $q$  e  $r$  é a quantidade das mensagens de tipo DIO, DIS e DAO respectivamente.

#### (c) Latência da rede

A latência total da rede  $Lt$ , conforme a equação (3), pode ser calculada como:

$$Lt = \sum_{k=1}^{Tpr} (tr(k) - te(k)), \quad (3)$$

onde  $Tpr$  é o número total de pacotes de dados recebidos com sucesso, cuja contagem é realizada no nó coletor,  $te$  e  $tr$ , é o tempo de envio e recepção do pacote respectivamente. A latência média,  $Lm$ , conforme a equação (4), é dada por:

$$Lm = Lt / Tpr. \quad (4)$$

#### (d) Taxa de Entrega de Pacotes

A taxa de entrega de pacotes  $TEP$ , conforme a equação (5), pode ser calculada como:

$$TEP = Tpr / Npe, \quad (5)$$

onde  $Npe$  é o número de pacotes de dados enviados de todos os nós para o coletor.

## IV. ESPECIFICAÇÕES EM COOJA

Na simulação em Cooja, a fim de adicionar as perdas no meio sem fio, foi utilizado o *Cooja Unit Disk Graph Medium*, que adiciona as perdas em relação às distâncias relativas dos nós, com base nas distribuições dos nós de acordo com os diferentes cenários indicados na Seção III para o simulador Cooja, como mostrado na Figura 6. Os parâmetros para a simulação e seu ambiente são mostrados na Tabela I. Nessa

configuração, adotaram-se as especificações RPL definidas no Wi-SUN FAN, além de um atraso inicial para que o aplicativo comece a transmitir mensagens para o nó Roteador de Borda. Este atraso foi definido com base no tempo aproximado para a convergência inicial da rede e garante que o pacote enviado ao servidor não seja perdido devido à falta de conectividade de rede. Realiza-se para cada cenário uma simulação de 20 minutos, com envio de pacotes de dados de 96 bytes em intervalos aleatórios.

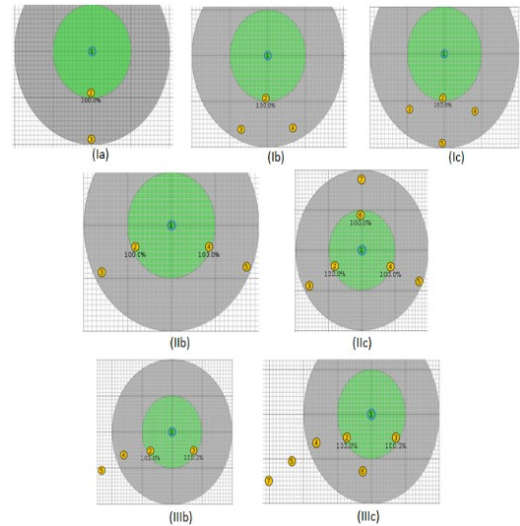


Figura 6. Nós em cenários de transmissão no Simulador Cooja

TABELA I. ESPECIFICAÇÕES RPL WI-SUN FAN COM COOJA.

Parâmetro	Valor/Especificação
RPL	modo non-storing
OF	ETX
DIO min	15
DIO doublings	2
DIO redundancy	Habilitado
Send Interval	32 seg.
Tx / Rx radio	100% / 100 %
Tx / INT range	100 m / 200 m
Tempo de simulação	20min.

Analisando a configuração dos dados, observa-se um  $DIO_{min} = 15$ , indicando que o tempo inicial para o envio da primeira mensagem de controle será 32 segundos para iniciar a formação do DODAG. Configura-se também um tempo inicial, offset, de 180 segundos para o envio do primeiro pacote de dados.

## V. RESULTADOS

### A. Tempo de convergência da rede.

A Figura 7 mostra os resultados do tempo de convergência para cada cenário. Observa-se um tempo de convergência para os cenários *Ib*, *Ic*, *IIb* e *IIIb* menor que 180 s, indicando que não há perda de pacotes de dados, porque está dentro do intervalo de tempo inicial offset. Já nos cenários: *Ia*, *IIc* e *IIIc*, observa-se um tempo de convergência superior a 180 s para concluir a formação da rede, o que gera perdas dos pacotes de dados. O cenário *IIIc* apresenta um tempo consideravelmente maior, principalmente porque este cenário possui mais profundidade da rede e precisa de mais tempo para a troca de mensagens de controle. No caso do cenário menor *Ia*, precisasse de um tempo superior a 182.32 s. É possível concluir, de acordo com a comparação dos cenários *IIc* e *IIIc*, que o tempo

de convergência da rede é menor para o tipo de topologia estrela.

**B. Controle de sobrecarga de tráfego.**

A Figura 8 mostra a quantidade de mensagens de controle em cada cenário simulado. Conforme esperado, os cenários *Ic*, *Ic* e *IIIc* têm mais mensagens de controle, já que os mesmos possuem um número maior de nós em sua topologia. Com relação aos cenários *Ic* e *IIIc* é interessante notar que, mesmo possuindo igual número de nós, o cenário *IIIc* precisa trocar um número maior de mensagens de controle. Esse comportamento é devido a maior profundidade da rede no cenário *IIIc*. Já quando comparados os cenários *Iib* e *IIIb* nota-se que ambos possuem a mesma quantidade de nós, mas o cenário *Iib* necessita de um número um pouco menor de mensagens de controle. Como o cenário *Iib* possui dois nós de drenagem na mesma profundidade, diferente do cenário *IIIb* que tem os dois nós de drenagem em série e um nó final comunicado direto no raiz, o número de mensagens de controle é reduzido.

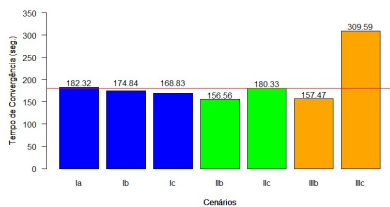


Figura 7. Tempo de convergência por cenários

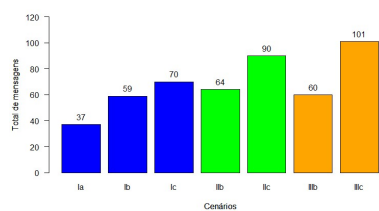


Figura 8. Mensagens de controle por cenário

**C. Latência da rede.**

A Figura 9 mostra a latência média da rede em cada cenário. Observa-se que a latência se incrementa pela quantidade de nós e profundidade da rede. De acordo com a comparação dos cenários *Ic* e *IIIc*, verifica-se que a latência da rede é menor para o tipo de topologia estrela.

**D. Taxa de Entrega de Pacote.**

A Figura 10 mostra a taxa de entrega de pacotes da rede em cada cenário. Conforme indicado nas análises de convergência, os cenários *Ia*, *Ic* e *IIIc*, tiveram perdas de pacotes de dados no início da transmissão de dados, já que o tempo inicial, offset, é menor que o tempo de convergência.

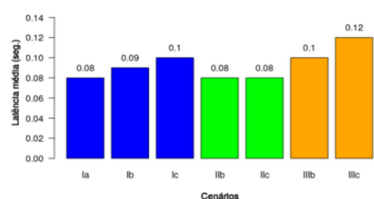


Figura 9. Latência média da rede por cenários

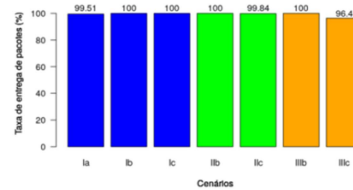


Figura 10. Taxa de entrega de pacotes por cenários

**VI. CONCLUSÕES**

A partir dos resultados das simulações conclui-se que os cenários *Ia*, *Ib*, *Ic*, *Iib* e *IIIb* simulados para Wi-SUN FAN devem iniciar com um tempo de offset superior a 182.32 s, evitando a perda de pacotes iniciais ao aguardar o tempo de convergência da rede. Comparando o cenário *Ic*, tipo estrela, com relação ao cenário *IIIc*, tipo árvore, o primeiro precisa de menor tempo de convergência e tem menor quantidade de mensagens e latência na rede. Assim, é importante considerar as métricas analisadas tanto no dimensionamento quanto na expansão da rede, já que o balanceamento adequado para a escolha da melhor posição do Roteador de Borda impacta diretamente no desempenho da rede.

**AGRADECIMENTOS**

Este trabalho foi financiado pelo projeto PD 0047 0080/2017 do programa de P&D Aneel do grupo Neoenergia.

**REFERÊNCIAS**

- [1] Wi-SUN Alliance, Disponível em: < https://www.wi-sun.org >. Acesso em: 30 de Abril, 2019.
- [2] WI-SUN FAN, “Technical Profile Specification Field Area Network, Field Area Network Working Group (FANWG)”, *Confidential c Wi-SUN Alliance*, 2017.
- [3] Ali, Hazrat, “A performance evaluation of rpl in contiki”, 2012
- [4] Mardini, W., Ebrahim, M., & Al-Rudaini, M. (2017). “Comprehensive Performance Analysis of RPL Objective Functions in IoT Networks”. *International Journal of Communication Networks and Information Security*, v. 9, n. 3, pp. 323-332, 2017.
- [5] Chen, Yibo, Jean-Pierre Chanet, and Kun Mean Hou. "RPL Routing Protocol a case study: Precision agriculture." 2012.
- [6] da Silva, C. A. G., dos Santos, E. L., Ferrari, A. C. K., & dos Santos Filho, H. T. “A study of the mesh topology in a zigbee network for home automation applications”. *IEEE Latin America Transactions*, v. 15, n. 5, p. 935-942, 2017.
- [7] Zikria, Y. B., Afzal, M. K., Ishmanov, F., Kim, S. W., & Yu, H. “A survey on routing protocols supported by the Contiki Internet of things operating system”. *Future Generation Computer Systems*, v. 82, p. 200-219, 2018.
- [8] IEEE 802.15.4, “IEEE Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)”, IEEE Std 802.15.4-2015.
- [9] ANSITIA-4957.210, “Multi-hop Delivery Specification of a Data Link Sub-Layer”.
- [10] ANSITIA- RFC6775, “Neighbor Discovery Optimization for IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs)”.
- [11] Harada, H.; Mizutani, k.; Fujiwara, J.; Mochizuki, K.; Obata, k.; Okumura, R. “IEEE 802.15.4g based wi-sun communication systems”. The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, v. 100, n. 7, p. 1032–1043, 2017.
- [12] Junjalearnvong, T., Habara, T., Okumura, R., Mizutani, K., & Harada, H, “A dynamic routing protocol supporting mobile nodes in Wi-SUN FAN systems”. In *2017 20th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, pp. 325-331, 2017.
- [13] M. R. Khan, “Performance and route stability analysis of RPL protocol,” KTH Electrical Engineering, Oct. 2012.
- [14] Kurniawan, Agus. “Practical Contiki-NG: Programming for Wireless Sensor Networks”. Apress, 2018.