

Avaliação Experimental do Tempo de Formação de uma Rede Multi-salto do Padrão Wi-SUN FAN

Ananías Ambrosio, Giancarlo C. Heck, Rodrigo J. Riella, Luciana M. Iantorno, Bruna E. C. Santos, Débora de H. C. Rodrigues, Gustavo T. A. da Silva, José A. de S. Brito, Evelio M. G. Fernández

Resumo—Na atualidade o padrão Wi-SUN FAN (*Wireless Smart Ubiquitous Network Field Area Network*) está sendo de interesse para ser adotado por diferentes aplicações, por conseguir atender a demanda de larga escala de interconexão de diferentes dispositivos inteligentes. No entanto, o processo de formação da rede deste padrão é lento, o que se torna um problema para redes densas. Neste trabalho é realizada uma análise do tempo de formação da rede através de experimentos em uma rede multi-salto com oito dispositivos (sete saltos), com foco nos estados de junção 1 e 3 do padrão, que utilizam os diferentes pacotes de descoberta de rede governados pelo algoritmo *trickle timer*. Diferentes valores de configurações adequadas para esses dois estados são verificados e discutidos, o que permite identificar as características do processo de formação da rede para este padrão.

Palavras-Chave—Wi-SUN FAN, multi-salto, estados de junção, *trickle timer*.

Abstract—Currently, the Wi-SUN FAN (*Wireless Smart Ubiquitous Network Field Area Network*) standard is being of interest to be adopted by different applications, to be able to meet the large-scale demand for interconnection of different smart devices. However, the network formation process of this standard is slow, which becomes a problem for dense networks. In this work, an analysis of the network formation time is performed by means of experiments on a multi-hop network with eight devices (seven hop), especially on junction states 1 and 3 of the standard which use the different network discovery frames that are governed by the *trickle timer* algorithm. Different values of appropriate configurations in both states are verified and discussed, which allow identifying the characteristics of the network formation process for this standard.

Keywords—Wi-SUN FAN, multi-hop, junction state, *trickle timer*.

I. INTRODUÇÃO

Este trabalho avalia de forma experimental o padrão Wi-SUN FAN [1], definido pela aliança Wi-SUN como solução de comunicação para diversas aplicações, em especial para *Smart Grid* e *Smart City*. Uma característica importante do padrão é a utilização da topologia do tipo malha com multi-salto, o que estende a área de cobertura da rede. A solução para esta rede é de tipo hierárquico, com três tipos de nós [2]: Roteador de Borda (RB), Roteador (R) e Folha (F). O

Ananías Ambrosio, Giancarlo C. Heck, Rodrigo J. Riella e Evelio M. G. Fernández, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. E-mails: ananiasambrosio@ufpr.br, giancarlo.heck@ufpr.br, riella@ufpr.br, evelio@ufpr.br. Luciana M. Iantorno, Giancarlo C. Heck e Rodrigo J. Riella, Instituto Lactec. E-mails: luciana.iantorno@lactec.org.br, giancarlo.c@lactec.org.br e riella@lactec.org.br. Bruna E. C. Santos, Débora de H. C. Rodrigues, Gustavo T. A. da Silva e José A. de S. Brito, Neoenergia. E-mails: bruna.elisabete@neoenergia.com, gtravassos@neoenergia.com, debora.rodrigues@neoenergia.com, jbrito@neoenergia.com

padrão é baseado em protocolos abertos, tais como, padrão IEEE 802.15.4 [3] nas camadas física e de enlace, suporte ao IPv6 (*Internet Protocol version 6*), ICMPv6 (*Internet Control Message Protocol for IPv6*) e o protocolo RPL (*IPv6 Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks*) [4] na camada de rede e pacotes do tipo UDP (*User Datagram Protocol*) na camada de transporte. O padrão também possui como um dos seus principais objetivos, garantir a interoperabilidade entre equipamentos de diferentes fabricantes [5]. Essa característica tem motivado muitas concessionárias no Brasil a investirem no padrão Wi-SUN para suas redes Smart Grid, como em destaque a Neoenergia, que vem estudando e incentivando o uso desse padrão desde 2017, o que tem contribuído muito para expansão do Wi-SUN no país.

O padrão Wi-SUN FAN é uma especificação que está em constante evolução e, portanto, ainda possui muitos pontos a serem aprimorados. Comparando-se a última revisão da especificação do padrão [6] em relação a sua versão anterior, nota-se que foram sugeridas várias melhorias, como é o caso das configurações diferenciadas para redes de grande e pequena escala. Contudo, questões importantes como o tempo de formação da rede e a mobilidade de equipamentos são temas que ainda carecem de mais estudos.

As redes Wi-SUN FAN apresentam uma formação da rede lenta. Esse problema foi identificado em [7], onde um esquema de otimização do tempo de formação da rede é proposto e avaliado através de simulações, baseado em resultados experimentais previamente apresentados pelos mesmos autores [8], os resultados desses experimentos estão limitados a uma única configuração do algoritmo *trickle timer* [9] conforme à documentação fornecida pela aliança Wi-SUN no ano 2017. A documentação do padrão Wi-SUN FAN foi publicada pela primeira vez pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) no ano 2020 e atualizada no ano 2021 [3], nesta última publicação, foram adicionados novos parâmetros, entre eles a atualização do algoritmo *trickle timer* para a formação da rede, classificando dois cenários de redes: de grande e pequena escala. Portanto, a motivação principal é gerar dados experimentais dessas configurações.

No presente trabalho, medições dos tempos de formação da rede são realizadas utilizando esses novos parâmetros com foco nos estados de junção 1 e 3, verificando os tempos atuais de junção dos nós para uma topologia multi-salto com oito dispositivos (sete saltos). O artigo discute os tempos encontrados e a relação com o algoritmo *trickle timer* nesses estados de junção, também são verificadas as diferentes quantidades de pacotes trafegados na rede em cada configuração, que pode

resultar em uma maior probabilidade de colisão entre eles.

O artigo está organizado da seguinte forma: na Seção II é descrita a especificação técnica do padrão Wi-SUN FAN; na Seção III é detalhada a metodologia proposta; na Seção IV são apresentados os resultados e na Seção V as conclusões.

II. WI-SUN FAN

A arquitetura do protocolo Wi-SUN FAN segue o modelo de camadas OSI (*Open System Interconnection*). O protocolo é formado pelas camadas de transporte, oferecendo suporte aos protocolos UDP e TCP (*Transmission Control Protocol*), de rede, onde utiliza IPv6 com a adaptação 6LoWPAN (*IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks*), para a formação da rede usa o protocolo RPL e o ICMPv6 para as mensagens de controle. Na camada de enlace é formado por duas subcamadas, a LLC (*Logical Link Control*) e a MAC (*Media Access Control*), que juntamente com a camada física são definidas no padrão IEEE 802.15.4. Para a segurança e a autenticação utiliza o IEEE 802.1X e o EAP-TLS. A estrutura da pilha de protocolos é mostrada na Fig. 1.

Aliança Wi-SUN		
Camada	Wi-SUN FAN	
Transporte	UDP, TCP	
Rede	IPv6, ICMPv6, RPL, 6LoWPAN	Segurança 802.1x / EAP-TLS
Enlace	LLC	L2 Mesh (opcional)
	MAC	
PHY	IEEE 802.15.4	

Fig. 1. Perfil Wi-SUN FAN.

A. Tipos de nós

Uma rede Wi-SUN FAN é constituída por redes PAN (*Personal Area Networks*), que possuem uma rede hierárquica formada por três tipos de nós: (a) Roteador de Borda (RB), que mantém todas as informações de roteamento de origem para os outros nós. (b) Roteador (R), 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 (F), que é o nó que fornece as capacidades mínimas de descobrir, entrar na PAN, enviar e receber pacotes. A Fig. 2 ilustra uma rede Wi-SUN FAN com os diferentes tipos de equipamentos.

B. Descoberta e junção de nós

Para construir uma rede Wi-SUN FAN é necessário um RB e ao menos um nó R ou F. Todo nó que deseja se conectar à uma PAN inicia no estado de junção 1, onde um RB ou outros nós R, já conectados na rede, anunciam a presença da rede enviando periodicamente, por *broadcast*, mensagens do tipo PA (*PAN Advertisement*) contendo os parâmetros mínimos para a junção dos novos nós, de modo que o novo nó possa selecionar entre uma das várias PANs disponíveis. A transmissão das mensagens PA de cada nó é controlada por um *trickle timer*. Além disso, os **nós de junção** (nó que deseja se conectar à uma

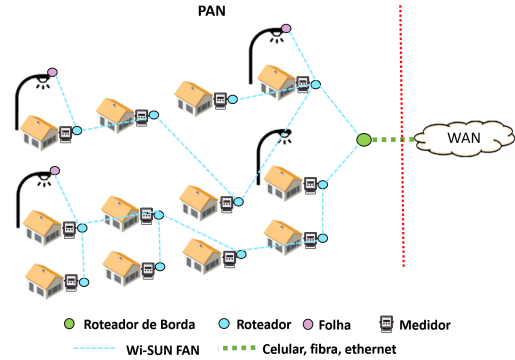


Fig. 2. Tipos de equipamentos Wi-SUN FAN.

rede) podem forçar o envio de PAs pelos seus vizinhos (antes do tempo previsto pelo *trickle timer*), através da transmissão de mensagens do tipo PAS (*PAN Advertisement Solicit*). No estado de junção 1, os nós ainda não estabeleceram uma associação de segurança com a rede. Portanto, é importante que as mensagens PA exponham apenas a quantidade mínima de informações necessárias para validação da PAN e inclusão do nó transmissor como um nó candidato a pai. Após este estado, o nó de junção entra em um estado de junção 2, onde realiza o processo de autenticação, para nosso estudo este estado é deixado fora da análise. No próximo estado, o de junção 3, são transmitidas as mensagens do tipo PC (*PAN Configuration*), meio pelo qual a configuração ampla da rede é compartilhada, de forma criptografada. Assim como no caso do PA, a transmissão do PC é controlada por um *trickle timer* e os nós de junção podem forçar seu envio (antes do tempo previsto pelo *trickle timer*) através da transmissão de mensagens do tipo PCS (*PAN Configuration Solicit*). Os estados de junção 4 e 5, que representam respectivamente os estados de configuração de rota e nó operacional, são deixados de fora das análises para este estudo. A Fig. 3 mostra o fluxo dos pacotes PA, PAS, PC e PCS no processo de junção de um nó na rede.

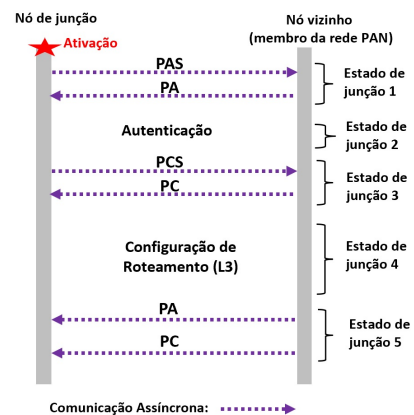


Fig. 3. Fluxo de mensagens de junção e descoberta.

C. Algoritmo de Trickle timer

O algoritmo de *trickle timer* é usado para disseminação de informação em Redes de Baixa Potência e com Perdas (LLN).

O *trickle timer* utiliza os conceitos de transmissão consistente e inconsistente, cuja definição fica a cargo dos protocolos que o utilizarem, no caso do padrão Wi-SUN FAN está definido de forma independente para cada tipo de pacote de descoberta e junção (PA, PAS, PC e PCS) [6]. Ele ajusta dinamicamente suas taxas de transmissão para espalhar novas informações em milissegundos (transmissão inconsistentes), e muda para enviar apenas algumas mensagens por hora quando as informações na rede não mudam (transmissão consistentes).

Além disso, permite que os nós ouçam as transmissões uns dos outros e excluam as suas próprias. Essas duas ações constituem os principais mecanismos do algoritmo: o período de adaptação e o período de supressão.

Para realizar o comportamento mencionado, o *trickle timer* divide o tempo em intervalos e define um conjunto de parâmetros variáveis. Os parâmetros globais, que são iguais para todos os nós, incluem os tamanhos mínimo e máximo dos intervalos de tempo I_{\min} e I_{\max} , respectivamente, e a constante de redundância k .

Além dos parâmetros globais, o *trickle timer* possui três variáveis que servem para o controle dos intervalos de tempo em que o nó deve restringir a transmissão das mensagens: I é o tamanho atual do intervalo; t é o valor no intervalo entre $\frac{I}{2}$ e I ; c é um contador que registra a quantidade de mensagens consistentes que foram recebidas. Um nó só tem possibilidade de transmitir mensagens no instante t , além de possuir a premissa de que o valor de c deve ser menor do que a constante k .

O funcionamento do *trickle timer* é descrito através do Algoritmo 1 [9]. No procedimento *TRICKLE TIMER*, executado na linha 2, é escolhido um valor I aleatoriamente entre I_{\min} e I_{\max} , então o primeiro intervalo é iniciado na linha 3. O procedimento *START_INTERVAL()* é executado para cada intervalo definido (linha 4). A linha 5 inicializa c em 0 e a linha 6 seleciona t aleatoriamente entre $\frac{I}{2}$ e I . Do início do intervalo até o tempo t , o nó fica impossibilitado de transmitir as mensagens. Enquanto o *trickle timer* estiver ativo (linha 7), a cada recebimento de uma mensagem considerada consistente o contador c é incrementado (linhas 9 e 10). No caso que receba uma mensagem inconsistente e I for maior que I_{\min} , ele reinicia o *trickle timer*, configura I para I_{\min} e retorna ao procedimento *START_INTERVAL()* (linha 11 até 14). O envio de mensagens só é permitido quando o intervalo de tempo atingir o valor de t , sendo que para o envio a quantidade de mensagens consistentes recebidas deve ser menor do que o limiar k (linhas 15 e 16). Após o término de cada período de tempo definido pelo *trickle timer*, o valor da variável I é dobrado e o temporizador é reiniciado (linhas 18 e 19).

Para o perfil FAN nos estados de junção 1 e 3, os parâmetros I_{\min} , I_{\max} e k são configurados com os valores $DISC_IMIN$, $DISC_IMAX$, e $DISC_K$, respectivamente. Os parâmetros globais de *trickle timer* são mostrados na Tabela I, definidos para dos cenários de redes: grande escala, para milhares de nós por PAN, e pequena escala, para dezenas ou centenas de nós por PAN [6].

Algorithm 1 Algoritmo *Trickle timer*

```

1: procedure TRICKLE_TIMER
2:    $I \leftarrow \text{random}[I_{\min}, I_{\max}]$ 
3:   START_INTERVAL()
4: procedure START_INTERVAL
5:    $c \leftarrow 0$ 
6:    $t \leftarrow \text{random}[\frac{I}{2}, I]$ 
7:   while trickle timer not expired do
8:     if nem mensagem then
9:       if consistent_mensagem then
10:         $c \leftarrow c + 1$ 
11:      else
12:         $I \leftarrow I_{\min}$ 
13:        reset_trickle_timer()
14:        START_INTERVAL()
15:      if trickle timer = t and c < k then
16:        transmit_message()
17:        update_trickle_timer()
18:    $I \leftarrow I * 2$ 
19:   START_INTERVAL
    
```

TABELA I
PARÂMETROS DE TRICKLE TIMER DO WI-SUN FAN.

Tipo de rede	$DISC_IMIN$ (s)	$DISC_IMAX$ (duplicações)	$DISC_K$
Grande escala	60	4	1
Pequena escala	15	2	1

III. METODOLOGIA

Para identificar a lenta formação da rede, foram realizadas capturas do fluxo de pacotes nos estados de junção 1 e 3 com um *testbed* como é mostrado na Fig. 4, constituído por um RB e sete R, os quais estão conectados por cabos seriais até um *hub*, e este até um computador, onde são capturadas as informações do processo de formação da rede para análise.

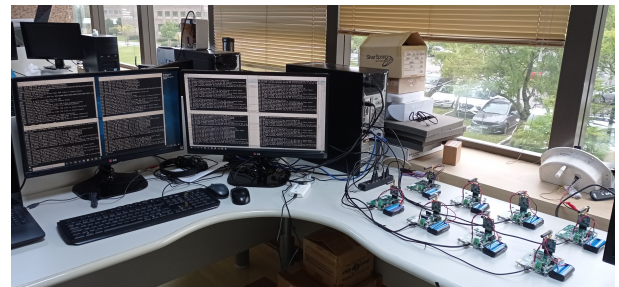


Fig. 4. *Testbed*.

A. Esquema experimental

A separação entre os dispositivos é de 10 cm e para conseguir os sete saltos entre os dispositivos em uma área pequena, foi utilizado uma *whitelist* que é uma filtragem de endereços no *software*, a qual permitiu limitar a comunicação de RF (Radiofrequência) entre eles e definir os seus vizinhos. O RB com R1 como vizinho, o R1 com vizinhos RB e R2, o R2 com vizinhos R1 e R3, o R3 com vizinhos R2 e R4, o R4 com vizinhos R3 e R5, o R5 com vizinhos R4 e R6, o R6 com vizinhos R5 e R7 e o R7 com vizinho R6. O esquema de conexão dos dispositivos é mostrado na Fig. 5.

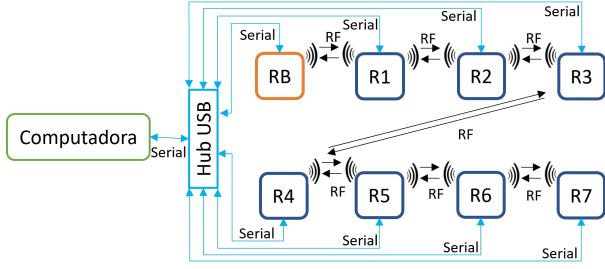


Fig. 5. Esquema de conexão de dispositivos.

B. Parâmetros de configuração dos dispositivos

Os parâmetros de configuração dos dispositivos na rede Wi-SUN FAN são mostrados na Tabela II.

TABELA II
PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO DOS DISPOSITIVOS.

Descrição	Parâmetros
Faixa de frequência	902-907,5 e 915-928 MHz (Brasil)
Modo de operação	1b
Data rate	50 kbps
Potência	100 mW
Salto de Frequência	habilitado (90 canais)

C. Configurações de Tickle timer nos experimentos

Para os estados de junção 1 e 3 são configurados diferentes valores nos parâmetros globais do algoritmo *trickle timer* para os pacotes PA, PAS, PC e PCS. A Tabela III mostra os diferentes cenários dos experimentos realizados.

TABELA III
CENÁRIOS EXPERIMENTAIS DO TICKLE TIMER.

Cenário	I_{min} (s)	I_{max} (duplicações)	k	Notação
C1	15	2	1	C1 (15, 2)
C2	15	4	1	C2 (15, 4)
C3	30	2	1	C3 (30, 2)
C4	30	4	1	C4 (30, 4)
C5	60	2	1	C5 (60, 2)
C6	60	4	1	C6 (60, 4)

Verificando-se que C1 e C6 são os cenários com os parâmetros definidos pelo padrão Wi-SUN FAN para as redes de grande e pequena escala, respectivamente. Adicionou-se combinações intermediárias nos parâmetros para realizar as comparações do comportamento de troca de pacotes de descoberta e junção, cenários C2, C3, C4 e C5. O objetivo dos experimentos foi realizar a medição dos tempos de cada nó R para se juntar com o nó RB. Cada experimento foi repetido 10 vezes para cada uma das configurações. O procedimento para cada experimento foi de ligar primeiro os Roteadores, de forma ordenada, com intervalos de aproximadamente quatro segundos entre eles e, por último, ligar o RB. As medições foram realizadas nos cinco estados de junção, durante os sete saltos do esquema proposto.

A medição do tempo foi realizada para cada um dos saltos em forma contínua: do Salto 1 (S1) até o Salto (S7) e do

Estado de Junção 1 (EJ1) ao Estado de Junção 4 (EJ4). Os tempos foram registrados a partir do tempo de ligação do RB (tempo 0s) até o indicativo de término de cada um dos estados, conforme descrito na Tabela IV.

TABELA IV
INDICATIVO DE TÉRMINO DO ESTADO.

Estado	Indicativo de Término de Estado
EJ1	Recebimento do pacote PA
EJ2	Recebimento do último pacote de autenticação GTK (<i>Group Transient Key</i>)
EJ3	Recebimento do pacote PC
EJ4	Recebimento do último pacote do processo de roteamento DAO (<i>Destination Advertisement Object</i>) e entra no estado de junção 5

Realizou-se também a contagem total de pacotes de descoberta e junção transmitidos em todos os saltos Qt durante o processo de formação da rede para cada cenário.

$$Qt = Qt_{S1} + Qt_{S2} + Qt_{S3} + Qt_{S4} + Qt_{S5} + Qt_{S6} + Qt_{S7}, \quad (1)$$

onde $Qt_{Si} = \sum_{k=1}^{p_i} PA(k) + \sum_{k=1}^{q_i} PAS(k) + \sum_{k=1}^{r_i} PC(k) + \sum_{k=1}^{s_i} PCS(k)$ é a somatória dos pacotes de descoberta e junção. Os valores p_i , q_i , r_i e s_i representam a quantidade dos pacotes PA, PAS, PC e PCS, com valores de $i = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]$ para cada salto, respectivamente.

Para realizar o comparativo entre os tempos dos estados de junção com respeito ao tempo total da rede, realizou-se a medição do tempo dos EJ1, EJ2, EJ3 e EJ4, de forma independente para cada salto. Os tempos foram registrados a partir do início de um estado até o indicativo de término do estado (Tabela IV), respectivamente para cada estado, nos setes saltos. Posteriormente foi determinada a média dos tempos de cada estado para efeitos de comparação.

IV. RESULTADOS

A Tabela V mostra as medições dos tempos dos estados de junção do processo de formação da rede para os sete saltos. Os dois modos de configuração dos parâmetros de descoberta e junção (PA, PAS, PC e PCS) do padrão Wi-SUN FAN estão representados pelos cenários C1 (15, 2) e C6 (60, 4), apresentando como resultado do tempo de formação da rede os valores de 1349,6 s e 2029,9 s, respectivamente. Os cenários C1 (15, 2) e C2 (15, 4), com menores valores de I_{min} (15 s), apresentaram menores tempos de formação da rede, de 1349,6 s e 1343,2 s respectivamente, enquanto os cenários C5 (60, 2) e C6 (60, 4) com I_{min} (60 s), resultaram nos maiores tempos de formação da rede, com 2145,4 s e 2029,9 s respectivamente.

Para os cenários com um mesmo I_{min} e I_{max} diferente, o cenário com maior I_{max} (duplicação de intervalo) resultou em um menor tempo de configuração da rede. Portanto, a partir da Tabela V, conclui-se que no padrão Wi-SUN FAN, para redes pequenas, um menor I_{min} de envio de pacotes de descoberta e junção, resulta em um tempo menor do processo de formação de rede. Ainda, a configuração de um maior I_{max} , permite

diminuir a ocupação do canal de rádio e consequentemente melhorar o tempo de formação da rede em relação a um I_{max} menor.

TABELA V

TEMPOS DOS ESTADOS DE JUNÇÃO DOS CENÁRIOS (EM SEGUNDOS).

S - EJ	C1 (15, 2)	C2 (15, 4)	C3 (30, 2)	C4 (30, 4)	C5 (60, 2)	C6 (60, 4)
S1 - EJ1	25,3	22,9	101,9	48,4	122,3	131,9
S1 - EJ2	37,4	35,0	113,4	60,5	134,0	143,7
S1 - EJ3	67,8	55,3	203,6	96,9	189,4	205,8
S1 - EJ4	173,5	159,8	304,3	192,8	272,0	301,7
S2 - EJ1	201,2	190,7	340,0	243,4	338,8	359,3
S2 - EJ2	215,5	205,3	354,4	257,7	352,7	373,2
S2 - EJ3	239,3	223,1	393,4	303,1	437,2	454,6
S2 - EJ4	340,8	329,4	486,3	401,8	520,8	555,2
S3 - EJ1	374,7	354,1	522,2	457,7	622,8	676,0
S3 - EJ2	402,5	370,3	538,3	479,0	648,5	701,4
S3 - EJ3	433,6	388,3	581,7	534,3	751,8	792,9
S3 - EJ4	542,5	497,8	685,1	635,7	842,6	912,5
S4 - EJ1	573,4	518,3	748,8	673,5	946,9	984,4
S4 - EJ2	593,8	536,3	771,5	691,1	969,6	1002,3
S4 - EJ3	633,9	558,5	841,7	740,0	1064,7	1094,8
S4 - EJ4	737,7	645,2	935,5	849,0	1179,7	1173,7
S5 - EJ1	760,7	742,9	984,3	876,0	1266,6	1240,0
S5 - EJ2	788,3	773,8	1009,0	898,1	1298,0	1260,1
S5 - EJ3	808,6	808,8	1037,3	945,9	1387,2	1352,8
S5 - EJ4	915,8	929,7	1144,3	1047,2	1486,6	1446,7
S6 - EJ1	944,1	961,9	1181,0	1098,5	1569,9	1529,9
S6 - EJ2	987,6	989,8	1209,6	1122,8	1598,1	1562,7
S6 - EJ3	1021,7	1019,7	1241,5	1154,4	1718,7	1658,0
S6 - EJ4	1128,8	1127,1	1358,3	1265,3	1850,8	1746,9
S7 - EJ1	1163,6	1153,5	1402,9	1299,1	1936,1	1808,9
S7 - EJ2	1199,9	1180,4	1430,9	1336,9	1964,1	1837,9
S7 - EJ3	1246,2	1214,5	1477,0	1374,6	2051,1	1923,0
S7 - EJ4	1349,6	1343,2	1576,5	1485,6 s	2145,4	2029,9

A Fig. 6 exibe a quantidade média do número total de pacotes dos tipos PA, PAS, PC e PCS transmitida nos experimentos. Nota-se que os cenários com menores valores de I_{mim} e I_{max} produzem maior número de pacotes e, consequentemente, uma maior ocupação do canal.

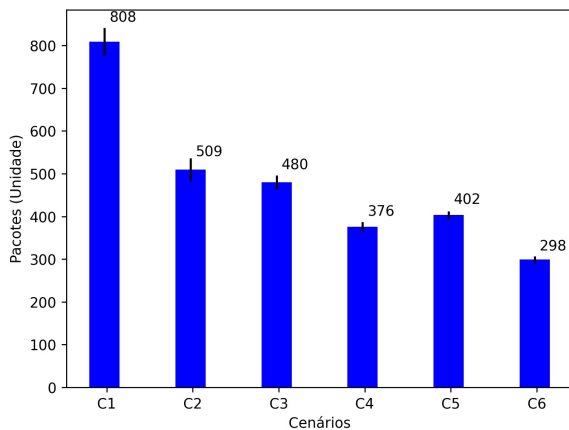


Fig. 6. Quantidade de pacotes PA, PAS, PC e PCS.

A Fig. 7 ilustra os tempos médios decorridos em cada estado de junção nos seis cenários avaliados. Percebe-se que a variação do parâmetro I_{mim} (15, 30 e 60) reflete diretamente no tempo resultante dos EJ1 e EJ3 (tendência de duplicação). Por outro lado, como as configurações dos parâmetros de *trickle timer* dos EJ2 e EJ4 (Autenticação e Configuração de roteamento) são independentes do EJ1 e EJ3, e não foram modificadas, seus resultados não apresentam grandes variações.

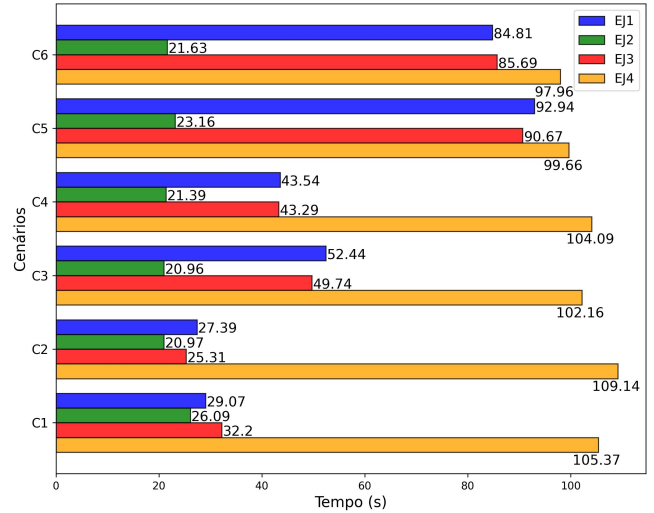


Fig. 7. Tempo médio decorrido em cada estado de junção.

V. CONCLUSÕES

Através deste trabalho experimental em uma rede multi-salto de sete saltos, foram coletadas informações das mensagens de descoberta e junção do protocolo Wi-SUN FAN para duas configurações recomendadas no protocolo (C1 e C6), além de configurações intermediárias, permitindo verificar tempos de formação da rede altos nesses cenários, de 1349,6 s e 2029,9 s respectivamente. Verificou-se também que a utilização de intervalos maiores entre o envio de mensagens ajuda a reduzir o tempo do processo de formação de rede, pois reduz a ocupação do canal de rádio.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Neoenergia pelo financiamento a este estudo, através do projeto PD-00047-0091/2021 do programa de P&D Aneel.

REFERÊNCIAS

- [1] 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, pp. 1032-1043, 2017.
- [2] 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, December 2017.
- [3] IEEE 802.15.4, "IEEE Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)", IEEE Std 802.15.4-2020.
- [4] Khan, M. R. Performance and route stability analysis of RPL protocol. 2012.
- [5] Ambrosio, A., Riella, R. J., Iantorno, L. M., Gomes, V. B., & Fernández, E. M. Wi-SUN FAN Interoperability: Verification through Experiment Test.
- [6] WI-SUN FAN, "Technical Profile Specification Field Area Network", Field Area Network Working Group (FANWG), IEEE Std 2857-2021.
- [7] Junjalearnvong, T., Junjalearnvong, T., Okumura, R., Mizutani, K., & Harada, H.. "Performance evaluation of multi-hop network configuration for Wi-SUN FAN systems." 2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). IEEE, 2019.
- [8] Junjalearnvong, T., Habara, T., Okumura, R., Mizutani, K., and Harada, H., "Experimental Performance Evaluation of Multi-Hop Configuration and Transmission in Wi-SUN FAN Devices", Technical Report of IEICE, vol. 117, no. 458, SRW 2017-88, pp. 93-98, February 2018.
- [9] Levis, P., Clausen, T., Hui, J., Gnawali, O., & Ko, J., The trickle algorithm. Internet Engineering Task Force, RFC6206, 2011, p. 1-13.