

Avaliação do Uso de Adaptação de Canal e Estimação de Qualidade de Enlace em Redes TSCH

Diego V. Queiroz, Ruan D. Gomes, Iguatemi E. Fonseca, Cesar Benavente-Peces, Marcelo S. Alencar

Resumo— O protocolo *Time-Slotted Channel Hopping* (TSCH) tem atraído a atenção dos pesquisadores por lidar com problemas de interferência e multipercursos, com o método de salto em frequência. Para um bom desempenho da rede, é necessário realizar o gerenciamento de lista negra de canais, com base em um estimador de qualidade de enlace, de modo a evitar o uso de canais com baixa qualidade na rede. Esse trabalho avalia o uso de adaptação de canais, com base na estimação de qualidade de enlace, em redes TSCH com topologia em estrela. Os resultados mostram que uma lista negra maior leva a um aumento no desempenho, quando a estimação é realizada de forma contínua.

Palavras-Chave— IEEE 802.15.4e TSCH, redes de sensores sem fio industriais, adaptação de canal

Resumo— The *Time-Slotted Channel Hopping* (TSCH) protocol has attracted the researchers' attention for being able to handle interference and multipath problems with the frequency hopping method. To perform well it is necessary to manage the channel blacklists, based on a link quality estimator, to avoid using channels with low quality. This work evaluates the use of channel adaptation, based on link quality estimation, in TSCH networks with star topology. The results have shown that a larger blacklist leads to an increase in performance, when the estimation is performed continuously.

Palavras-chave— IEEE 802.15.4e TSCH, industrial wireless sensor networks, channel adaptation

I. INTRODUÇÃO

O padrão mais recente para Redes de Sensores Sem Fio Industriais (RSSFI), o IEEE 802.15.4-2015, também chamado de IEEE 802.15.4e, introduz várias alterações na camada de acesso ao meio (MAC) em relação ao padrão anterior, o IEEE 802.15.4-2003. Cinco novos modos de operação foram definidos, dos quais apenas três têm sido efetivamente pesquisados [1], são eles: *Time-Slotted Channel Hopping* (TSCH), *Deterministic and Synchronous Multichannel Extension* (DSME) e *Low-latency Deterministic Network* (LLDN).

O modo TSCH define um protocolo MAC que divide o tempo em janelas (*timeslots*) e usa múltiplas frequências (no máximo 16), por meio do método FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*), para lidar com interferência e atenuação por múltiplos percursos. No entanto, problemas de confiabilidade ainda podem surgir e precisam ser mitigados, especialmente

Diego V. Queiroz é doutorando da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e da Universidade Politécnica de Madrid (UPM), Ruan D. Gomes é professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – Campina Grande, Iguatemi E. Fonseca é professor da Universidade Federal da Paraíba, Cesar Benavente-Peces é professor da UPM, e Marcelo S. Alencar é professor visitante da Universidade Federal da Bahia (UFBA), E-mails: diego@sti.ufpb.br, ruan.gomes@ifpb.edu.br, iguatemi@ci.ufpb.br, cesar.benavente@upm.es, malencar@dee.ufcg.edu.br.

se a qualidade dos canais usados na rede não é levada em consideração [2].

O TSCH considera o uso de lista negra para canais que apresentam baixa qualidade. Outros padrões para RSSFI, como o WirelessHART e o ISA100.11a, também usam o conceito de salto em frequência e lista negra. O WirelessHART emprega um gerenciador de rede central com uma abordagem de salto em frequência e lista negra global. No ISA100.11a é definido um esquema de lista negra local, em que os nós abortam as transmissões em canais que estão inseridos na lista negra, o que pode evitar transmissões sem sucesso, mas pode causar um aumento no atraso e uma diminuição na Taxa de Recepção de Pacote (TRP) na camada de aplicação, caso pacotes sejam descartados antes de serem transmitidos.

Configurar a lista negra e programar as transmissões dos nós para que dois ou mais enlaces vizinhos não usem o mesmo canal ao mesmo tempo é uma tarefa desafiadora, já que no TSCH muitas transmissões paralelas podem ocorrer [3]. Existem duas abordagens para criar uma lista negra: global e local. Na primeira abordagem, todos os nós têm a mesma lista de canais, mas essa solução pode ser subótima, já que os canais podem apresentar qualidade diferente para diferentes enlaces da rede, mesmo se os nós que fazem parte dos diferentes enlaces estiverem próximos uns dos outros [4]. No segundo método, cada par de nós pode utilizar diferentes conjuntos de canais [5], ou seja, é definida uma lista negra específica por enlace, mas mecanismos de lista negra locais são mais complexos que as abordagens globais e podem introduzir colisões quando dois ou mais nós transmitem no mesmo *timeslot* com listas negras diferentes, o que pode resultar em múltiplos nós transmitindo no mesmo canal ao mesmo tempo. Além disso, se o ambiente for muito instável e a lista negra for modificada com muita frequência, a lista negra local pode não ser útil devido ao excesso de quadros de sinalização necessários para resincronização.

Para permitir um correto gerenciamento das listas negras, e manter a qualidade de serviço (QoS) da rede, é necessário realizar a estimação de qualidade dos enlaces [6]. Em alguns trabalhos, a estimação é feita pelo nó receptor [4], e outros a fazem no nó transmissor [2]. Esse trabalho realiza a estimação no nó coordenador, que nesse caso trabalha também como nó sorvedouro (*sink node*) e receptor dos pacotes em uma rede com topologia em estrela. Esse nó faz uma avaliação do perfil dos vários canais utilizando diferentes tamanhos de listas negras, de maneira a permitir que o protocolo se adapte às diversas condições do ambiente industrial simulado.

Nesse trabalho é proposto um protocolo chamado AB-TSCH (*Adaptive Blacklist TSCH*), baseado no TSCH, que

utiliza o método de salto em frequência adaptativo. Nessa solução, um nó dedicado estima a qualidade dos enlaces e decide quando os canais em uso precisam ser inseridos na lista negra. Esse dispositivo funciona como um nó estimador (LQE - *Link Quality Estimator*) e foi descrito inicialmente em um trabalho anterior [4]. Com base nas estimações realizadas pelo LQE, o AB-TSCH envia as informações de estimação por toda a rede utilizando quadros de sinalização (*beacons* aprimorados – EB). Para avaliar essa abordagem, nesse artigo foram realizadas simulações com diferentes tamanhos para a lista negra, e realizada uma comparação com a implementação básica do TSCH, que utiliza todos os 16 canais disponíveis em todos os enlaces.

II. IEEE 802.15.4E TSCH

As soluções sem fio tradicionais de baixa potência, como o IEEE 802.15.4-2003, geralmente operam em um único canal e usam algoritmos de contenção, como o Acesso Múltiplo de Detecção de Portadora com Prevenção de Colisão (CSMA/CA), para evitar colisões de pacotes no meio compartilhado. O TSCH funciona de maneira diferente, combinando o acesso em intervalos de tempo e múltiplos canais com salto em frequência. O acesso em intervalos de tempo aumenta a vazão da rede, eliminando a colisão entre os nós concorrentes e fornecendo latência determinística às aplicações. O uso de múltiplos canais permite que mais nós transmitam seus quadros ao mesmo tempo, no mesmo intervalo de tempo, com diferentes canais, aumentando a capacidade da rede e atenuando os efeitos de interferência e desvanecimento por múltiplos percursos [7].

Cada nó obtém informações de sincronização, salto em frequência, *timeslot* e *slotframe* quando EBs são recebidos de nós coordenadores. Depois de receber um EB, o nó é sincronizado com a rede e inicializa o *slotframe*. Cada *slotframe* periódico consiste em vários intervalos de tempo, e um intervalo de tempo permite que um nó envie um quadro de dados e receba a confirmação relacionada (ACK) no mesmo *timeslot*. Se o ACK não for recebido, a retransmissão do quadro de dados é adiada para o próximo intervalo de tempo atribuído ao mesmo enlace [7].

Os EBs são usados para anunciar a rede TSCH, mas a política de *beacons* não é especificada pelo padrão IEEE 802.15.4e, e alguns trabalhos apresentam propostas para implementar essa política [8]. Na proposta apresentada para o AB-TSCH, o nó coordenador envia *beacons* pelos 16 canais existentes de forma sequenciada.

No TSCH, um enlace entre dois nós pode ser representado por um par de *timeslot* no *slotframe* (n), e o *channelOffset* usado pelos nós naquele intervalo de tempo, definido como $[n, \text{channelOffset}]$. O canal f a ser usada para transmitir no *timeslot* n do *slotframe* pode ser definido da seguinte forma:

$$f = FHS[(ASN + CO) \bmod FHS_L], \quad (1)$$

em que FHS é a lista de canais habilitados para o enlace, ASN é o número do *slot* absoluto, que representa o número total de *timeslots* já decorridos desde o início da transmissão na rede,

mod é o operador de resto de divisão, e FHS_L é o número de canais no conjunto FHS .

Ao usar o mecanismo de salto em frequência, os nós geralmente mudam para um novo canal antes de cada transmissão, o que torna a rede mais robusta contra problemas que afetam apenas um subconjunto dos canais. No entanto, se um gerenciamento adequado da lista negra de canais não for feito, o desempenho da rede pode ser significativamente degradado [9].

Existem 16 canais diferentes disponíveis para comunicação no padrão IEEE 802.15.4e, e cada um é identificado pelo CO , com valores inteiros entre 0 e 15. No entanto, devido aos problemas inerentes das redes sem fio, especialmente em ambientes industriais, alguns dos canais devem ser inseridos na lista negra, diminuindo o número de canais disponíveis. Por causa disso, um novo FHS deve ser gerado toda vez que um canal for inserido ou retirado da lista negra.

A. Lista Negra de Canais

A lista negra de canais é um método de seleção adaptativa de canal que ainda possui muitas questões em aberto no protocolo TSCH. Para cada pacote a ser transmitido ou recebido em um *timeslot* específico, a lista negra é verificada e, se o canal originalmente atribuído àquele *timeslot* estiver na lista negra, ele será substituído por outro não relacionado, de maneira pseudoaleatória. A reconfiguração da lista negra pode ser iniciada pelo nó transmissor ou receptor.

Em [10], os autores apresentaram o *Adaptive* TSCH (A-TSCH), que usa lista negra de canais. Os nós transmissores ficam cientes da lista negra dos vizinhos, e tanto o transmissor quanto o receptor usam a mesma sequência de salto para se comunicar, inserindo as informações da lista em pacotes de transmissão. O mesmo processo é executado para manter as informações de temporização. O A-TSCH, que é considerado é o estado da arte para soluções com uso de listas negras, foi codificado sob a pilha de protocolos do sistema operacional Berkeley OpenWSN e implementado na plataforma dos sensores GINA.

A desvantagem da técnica A-TSCH [10] é que ela reserva dois *timeslots* de um *slotframe*, o que prejudica a vazão da rede. Além disso, a taxa de amostragem no A-TSCH é de duas por *slotframe*, e ela é diretamente afetada pela dimensão do *slotframe*. O estimador de qualidade de enlace utilizado nesse trabalho faz uso de um nó dedicado à estimação de qualidade de enlace, integrado ao coordenador da rede, como descrito em um trabalho anterior [4], de modo que não é necessário incluir *timeslots* dedicados à estimação de qualidade de enlace. Além disso, os modelos descritos em [4] permitem avaliar os enlaces considerando diversos aspectos que influenciam em sua qualidade, como sombreamento, atenuação por multipercursos e interferência.

O algoritmo MABO-TSCH [2] combina escalonamento no tempo de forma centralizada e lista negra local. Diversos *channelOffsets* são atribuídos dentro do mesmo *timeslot*, de modo que um enlace possa escolher um dos que não forneça um canal na lista negra. Dessa forma, para ser reativo, um par de nós decide localmente os canais a serem inseridos na lista.

Para manter uma lista consistente para o enlace, eles o inserem no pacote ACK, combinado com um número de sequência. Para estimar a qualidade do canal, a MABO-TSCH explora o problema do *Stochastic Multi-Armed Bandits* (MAB). O MABO-TSCH [2] é uma técnica adequada para redes TSCH em grande escala, nas quais cada nó possui poucos vizinhos e a negociação em uma lista negra local não requer muitos pacotes de controle entre os vizinhos, se tornando ineficiente em redes pequenas e densas.

Outra técnica semelhante à lista negra é o gerenciamento de listas brancas. Os autores em [11] demonstraram que o uso de listas brancas pode aumentar a confiabilidade do TSCH restringindo o uso de apenas canais com boa qualidade. O método de lista branca dinâmica de canais é usado em [12], no qual os autores propõem uma versão melhorada do TSCH, chamada *Enhanced TSCH* (ETSCH), que usa uma técnica de estimação de qualidade de canais não intrusiva chamada NICE. O ETSCHE, em conjunto com uma técnica distribuída de detecção de canal (ETSCHE+DCS), detecta dinamicamente canais de boa qualidade para serem usados nas comunicações.

A técnica DCS requer a transmissão de pacotes sem conteúdo útil nos *timeslots* dedicados. Ele atualiza frequentemente uma sequência de canais e configura uma lista secundária com os melhores canais pelos quais os EBs são transmitidos. Pelo menos duas amostras da energia do canal são feitas por intervalo de tempo, e o uso de uma lista secundária reduz a probabilidade de perder EBs. A técnica ETSCHE+DCS [12] foi desenvolvida com foco em RSSF veiculares, que pode se comportar de maneira diferente do ambiente industrial do qual esse trabalho trata.

O A-TSCH usa os 16 canais para transmitir EB periodicamente, como foi feito no artigo citado. Embora usar os 16 canais possa causar perdas em alguns enlaces, ao usar tanto os canais com boa qualidade como os canais com baixa qualidade, é preferível aumentar a diversidade de canais em enlaces *broadcast*, uma vez que é difícil definir um pequeno subconjunto de canais que apresentem boa qualidade para todos os receptores em simultâneo. O ETSCHE+DCS utiliza uma lista secundária de canais para os EBs com apenas os melhores canais, o que diminui a probabilidade de perdas de EB, mas exige um processamento extra nos nós sensores, o que influencia no consumo de energia.

III. DESCRIÇÃO DO AB-TSCH

Neste trabalho é proposto um protocolo para RSSFI chamado *Adaptive Blacklist TSCH* (AB-TSCH), baseado no TSCH, lista negra de canais adaptativa, utilizando um estimador de qualidade de enlace de tempo real. Esse protocolo permite o uso do método de adaptação de canal, no qual apenas um canal é utilizado por enlace (ou seja, com *blacklist* de tamanho 15) e o canal é modificado apenas quando apresentar baixa qualidade. O protocolo é comparado com o método de salto em frequência típico do TSCH com e sem lista negra.

Diferentemente dos trabalhos mencionados na Seção II-A, a estimação da qualidade dos enlaces é realizada em tempo real no receptor, por meio de um nó dedicado para esse fim. O protocolo trabalha utilizando o método de adaptação de canal,

ilustrado no cenário de lista negra com 15 canais bloqueados, dos 16 canais estabelecidos no padrão. Esse método apresentou melhor desempenho do que nos cenários com tamanho menor da lista negra, e do que o protocolo TSCH na sua versão simples, que não possui *timeslots* dedicados aos EB e nem lista negra de canais.

Como forma de monitorar cada canal usado pelos nós, o nó receptor aguarda 10 valores do indicador de potência do sinal *Received Signal Strength Indication* (RSSI) de cada pacote de dados para aplicar o modelo e obter uma estimativa da TRP do enlace entre o nó final e o coordenador. Se esse valor ficar abaixo do limiar definido (90% para as simulações descritas neste artigo), o coordenador modifica o canal do enlace, a partir do próximo ciclo.

Para o ambiente proposto, com a quantidade de nós definida, foi estabelecido que, após 40 ciclos sem receber pacote do nó final, o nó coordenador entende que há um problema de desvanecimento profundo para aquele determinado enlace e decide trocar o canal do enlace com o nó em questão. Esse valor pode ser modificado, dependendo do tamanho da rede. A cada pacote recebido, uma *flag* associada ao nó transmissor é zerada, o que indica ao coordenador a inexistência de problema de desvanecimento profundo no enlace com o nó.

Ao contrário do esquema padrão, no qual um nó com pacote transmitido precisa receber confirmação de recebimento por parte do nó sorvedouro no mesmo *timeslot* de transmissão, neste trabalho os pacotes ACK são enviados em grupo pelo nó coordenador. Após receber os pacotes de dados dos nós finais durante um *slotframe*, o nó receptor envia um pacote EB para todos os nós finais, cuja carga útil (*payload*) possui as informações de todos os pacotes ACK por meio de um *bitmap*. A vantagem dessa abordagem é que se o canal em uso para transmissão dos pacotes de dados por um determinado nó apresentar problema de assimetria, ou seja, apresentar boa qualidade apenas na direção entre o nó final e o coordenador, o número de nós que eventualmente não receberão pacotes ACK nos mesmos *timeslots* definidos para transmissão será menor, já que os EB são enviados em todos os canais, de forma alternada.

Se um dos nós finais não receber o pacote ACK, ele considera que o nó coordenador não recebeu o pacote de dados, e o retransmite no intervalo de tempo atribuído a ele no próximo *slotframe*. Se o nó coordenador tiver recebido o pacote original no *slotframe* anterior, mas o nó final não tiver recebido o ACK, depois de receber o pacote retransmitido, o nó coordenador o considera como um pacote duplicado, e isso é contabilizado na estimativa de qualidade do canal. Na simulação, foi estabelecida, no máximo, uma retransmissão de cada pacote, e depois disso o pacote é considerado como perdido.

O método utilizado para o gerenciamento da lista negra usa uma lista negra de comprimento fixo. Quando um canal passa a apresentar baixa qualidade, de acordo com estimador de qualidade de enlace, ele é inserido na lista negra e algum outro canal que estava na lista negra é retirado da lista. Nesse trabalho, algumas métricas de desempenho foram analisadas como a TRP na camada MAC, a TRP na camada de aplicação, o número médio de tentativas de transmissão por pacote

(RNP), e a latência.

Após receber o EB, o nó está sincronizado na rede e pode enviar os pacotes de dados. Os EBs possuem informações de sincronização, incluindo o valor de ANS atual da rede e do *channelOffset*, úteis para os nós que perderam a sincronização, pois essas variáveis são utilizadas para o cálculo do canal seguinte na transmissão do pacote no *timeslot* definido para o nó. O EB também contém *bitmaps* com informações sobre a blacklist a ser utilizada por cada nó final para transmitir seus pacotes de dados.

IV. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Em [13], um modelo de simulação foi desenvolvido para simular protocolos multicanais para RSSFI. O modelo captura os efeitos do desvanecimento, sombreamento e as características não-estacionárias do canal em ambientes industriais, além de considerar as diferenças no comportamento dos 16 canais e a assimetria dos enlaces. O modelo foi integrado ao simulador de código aberto Castalia [14]. Além da perda pelo percurso em larga escala e do sombreamento, a atenuação em pequena escala foi incluída no modelo, utilizando a distribuição de *Rice*.

Como os canais são descorrelacionados em frequência, para simular protocolos que utilizam múltiplos canais, cada um precisa ser simulado simultaneamente com seus próprios parâmetros. Portanto, a mudança do canal pode melhorar a qualidade de um enlace, quando o canal em uso apresenta baixa qualidade. Toda vez que um novo pacote é transmitido na rede, o valor da potência recebida é gerado considerando os parâmetros armazenados para o enlace e o canal usado na transmissão. Isso permite capturar as características dos canais descorrelacionados e a assimetria dos enlaces. Os parâmetros do canal sem fio são definidos conforme indicado na Tabela I no script de simulação do Castalia.

TABELA I

PARÂMETROS DO CANAL SEM FIO NO CÓDIGO DE SIMULAÇÃO DO CASTALIA.

```
SN.wirelessChannel.pathLossExponent = 1.69
SN.wirelessChannel.PLd0 = 80.48
SN.wirelessChannel.d0 = 15
SN.wirelessChannel.sigma = 6.62
SN.wirelessChannel.K = 12.3
SN.wirelessChannel.K_sigma = 5.4
SN.wirelessChannel.meanTimeChange = 85
SN.wirelessChannel.seed = 0
```

Os primeiros quatro parâmetros são usados para calcular a perda pelo percurso e o sombreamento, e os parâmetros K e K_σ são usados para calcular o desvanecimento em pequena escala. O parâmetro *meanTimeChange* define o tempo médio de mudança nas características do canal, em minutos, e o *seed* define a semente usada para gerar os valores aleatórios da potência recebida durante a simulação. Se o valor de *seed* for definido como zero, uma semente diferente é definida para cada simulação, caso contrário, a mesma sequência de valores é gerada para diferentes simulações. O uso de uma semente fixa é útil para comparar diferentes abordagens com a mesma condição de canal.

Foram realizadas simulações para redes com 16 nós finais, e um nó coordenador, com potência de transmissão de 0 dBm, e com taxa de transmissão de 1 pacote/s. Os nós foram dispostos em uma área de 200×200 metros. Foram realizadas 10 replicações, com a rede em funcionamento durante quatro horas. Em cada replicação, a posição dos nós foi atribuída aleatoriamente, com distância máxima de $40\sqrt{2}$ m do coordenador. Para garantir um resultado justo, para cada replicação foi utilizada a mesma semente (parâmetro *seed* do simulador) para avaliar os dois protocolos, TSCH e o AB-TSCH, e diferentes sementes foram utilizadas nas diferentes replicações. Desse modo, ambos os protocolos foram avaliados considerando os nós na mesma posição e com as mesmas características para o canal sem fio durante as replicações.

Na Figura 1(a) são mostrados os valores de TRP na camada de aplicação para o protocolo TSCH, e para o AB-TSCH com listas negras (BL) de tamanhos 7, 9, 11, 13 e 15. A TRP na camada de aplicação considera todos os aspectos, incluindo retransmissões de pacotes e falhas na transmissão dos EBs. Na Figura 1(b) é mostrada a TRP na camada MAC, que considera apenas os pacotes que foram efetivamente transmitidos, desconsiderando os pacotes descartados devido a problemas na recepção dos EBs ou falhas de sincronização. Isso permite analisar a qualidade dos enlaces apenas em uma direção, dos nós finais até o coordenador. Na Figura 1(c) são mostrados os valores relativos ao RNP, que é o número médio de tentativas feitas para cada pacote de dados gerado na rede, independente da recepção. Foram utilizadas uma tentativa de transmissão e uma de retransmissão, em caso de não recebimento de confirmação por parte do nó coordenador, totalizando dois como valor máximo do RNP.

Quando é utilizada a adaptação de canal, que é um tipo de salto em frequência lento, como no cenário com lista negra de 15 canais, os resultados mostram uma TRP maior do que nas demais configurações, pois elas utilizam o salto em frequência rápido. O TSCH simples se comporta de maneira em que todos os canais são utilizados sem considerar o uso de um estimador de qualidade de enlace. Pelo fato de as demais configurações utilizarem esse estimador, o resultado mostra uma melhora na TRP, pois os canais com baixa qualidade são bloqueados. Como o canal no ambiente industrial sofre muitas variações, o mesmo canal que foi bloqueado pode ser desbloqueado após um período determinado, dependendo das variações no ambiente. Essa questão também foi considerada no desenvolvimento do AB-TSCH, que para o contexto desse trabalho, a reutilização do canal bloqueado foi feita de forma aleatória.

Na Figura 2 é possível ver a função de distribuição cumulativa empírica do atraso. Os gráficos com as informações de atraso consideram apenas os pacotes efetivamente recebidos. O atraso de acesso é menor para o protocolo AB-TSCH, uma vez que aproximadamente 97% dos pacotes foram entregues com um atraso menor que 172 ms. No TSCH, em torno de 90% dos pacotes foram entregues com atraso menor que 224 ms. Na rede com 16 nós finais, a duração de um *slotframe* no TSCH é igual a 160 ms, e no AB-TSCH, que considera o intervalo de tempo usado para transmitir o beacon, é igual a 170 ms. No AB-TSCH, 99,5% dos pacotes foram entregues com atraso

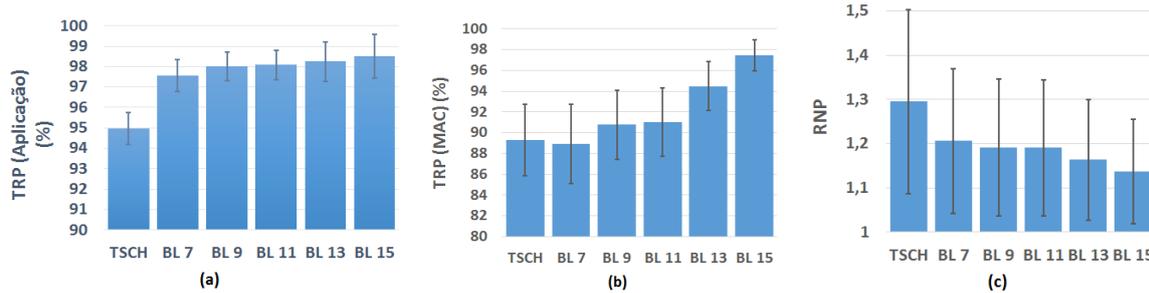


Fig. 1. a) TRP na camada de Aplicação. b) TRP na camada MAC. c) RNP.

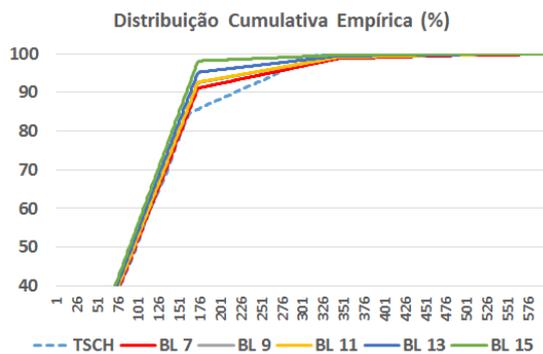


Fig. 2. Função de distribuição cumulativa empírica do atraso em ms.

inferior a 340 ms, que equivale a dois períodos de *slotframe*.

V. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este artigo apresentou um protocolo baseado no TSCH, chamado AB-TSCH, que utiliza a abordagem com EBs e configuração dinâmica de lista negra de canais, por meio de estimação de qualidade de enlace em tempo real, em redes com topologia em estrela. O protocolo foi comparado com o TSCH com configuração simples, e o AB-TSCH foi avaliado com tamanhos variados de listas negras. O AB-TSCH com lista negra máxima (15 canais) superou as demais configurações, uma vez que o nó permanece usando um bom canal durante um maior período de tempo e só realiza uma troca de canal quando o canal em uso passa a apresentar baixa qualidade. Essa abordagem apresentou bom desempenho, porque a qualidade dos enlaces foi monitorada de forma contínua.

Como trabalho futuro, serão analisadas redes com variadas configurações de nós, incluindo a rede com topologia em árvore, que é mais desafiadora do que a rede em estrela, devido às possibilidades de transmissões simultâneas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da COPELE-UFCG, do Instituto de Estudos Avançados em Comunicações (Iecom), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia, do projeto EM-SMART2 do Programa Erasmus Mundus, e do

Radio Engineering Research Group (GIRA) da Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

REFERÊNCIAS

- [1] D. V. Queiroz, M. S. Alencar, R. D. Gomes, I. E. Fonseca, and C. Benavente-Peces, "Survey and Systematic Mapping of Industrial Wireless Sensor Networks," *Journal of Network and Computer Applications*, sep 2017.
- [2] P. H. Gomes, T. Watteyne, and B. Krishnamachari, "MABO-TSCH: Multihop and blacklist-based optimized time synchronized channel hopping," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, p. e3223, aug 2017.
- [3] D. Zorbas, G. Z. Papadopoulos, and C. Douligeris, "Local or Global Radio Channel Blacklisting for IEEE 802.15.4-TSCH Networks?" in *IEEE International Conference on Communications (ICC 2018)*. IEEE, may 2018.
- [4] R. D. Gomes, D. V. Queiroz, A. C. Lima Filho, I. E. Fonseca, and M. S. Alencar, "Real-time link quality estimation for industrial wireless sensor networks using dedicated nodes," *Ad Hoc Networks*, vol. 59, pp. 116–133, may 2017.
- [5] V. Kotsiou, G. Z. Papadopoulos, P. Chatzimisios, and F. Theoleyre, "LA-BEL: Link-based Adaptive BLacklisting Technique for 6TiSCH Wireless Industrial Networks," in *Proceedings of the 20th ACM International Conference on Modelling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems - MSWiM '17*. New York, New York, USA: ACM Press, 2017, pp. 25–33.
- [6] R. D. G. e Iguatemi E. Fonseca e Marcelo S. Alencar, "Protocolos multicanais para redes de sensores sem fio industriais," *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, vol. 5, no. 2, pp. 25–32, 2015. [Online]. Available: <http://rtic.com.br/index.php/rtic/article/view/67>
- [7] D. De Guglielmo, S. Brienza, and G. Anastasi, "IEEE 802.15.4e: A survey," *Computer Communications*, may 2016.
- [8] E. Vogli, G. Ribezzo, L. A. Grieco, and G. Boggia, "Fast network joining algorithms in industrial IEEE 802.15.4 deployments," *Ad Hoc Networks*, vol. 69, pp. 65–75, feb 2018.
- [9] R. D. Gomes, M. S. Alencar, D. V. Queiroz, I. E. Fonseca, and C. Benavente-Peces, "Comparison between Channel Hopping and Channel Adaptation for Industrial Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of the 6th International Conference on Sensor Networks*. SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2017, pp. 87–98.
- [10] P. Du and G. Roussos, "Adaptive time slotted channel hopping for wireless sensor networks," in *2012 4th Computer Science and Electronic Engineering Conference (CEECE)*. IEEE, sep 2012, pp. 29–34.
- [11] T. Watteyne, A. Mehta, and K. Pister, "Reliability through frequency diversity," in *Proceedings of the 6th ACM symposium on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks - PE-WASUN '09*. New York, New York, USA: ACM Press, 2009, p. 116.
- [12] R. Tavakoli, M. Nabi, T. Basten, and K. Goossens, "Dependable Interference-Aware Time-Slotted Channel Hopping for Wireless Sensor Networks," *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 14, no. 1, pp. 1–35, jan 2018.
- [13] R. D. Gomes, D. V. Queiroz, I. E. Fonseca, and M. S. Alencar, "A Simulation Model for Industrial Multi-Channel Wireless Sensor Networks," *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 29–40, 2017.
- [14] Castalia, "Castalia simulator," access in: 21/02/2018. [Online]. Available: <https://github.com/boulis/Castalia>