

DRDS: Comunicação Dois-Rádios para Redes IEEE 802.15.4 TSCH

Guilherme A. S. Milanez², Luiz F. M. Vieira², Marcos A. M. Vieira², and José A. M. Nacif¹

¹Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas – Universidade Federal de Viçosa (UFV).
Email: jnacif@ufv.br

²Departamento de Ciência da Computação - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
Email: {guilhermeaguarsilvamilanez, lfvieira, mmvieira}@dcc.ufmg.br

Abstract—Este estudo propõe o protocolo Dual-Radio-Dual-Slotframe (DRDS), uma nova abordagem para melhorar o desempenho de redes de sensores sem fio com rádio duplo. Baseado no Time Slotted Channel Hopping (TSCH) na camada MAC, o protocolo utiliza uma alocação combinada de slotframes para dois rádios. Implementado e avaliado no Contiki-NG e Cooja, o DRDS demonstrou superioridade em termos de vazão de pacotes em todos os cenários analisados, destacando-se como uma solução promissora para otimizar redes IoT.

$$C \leq B_w \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1)$$

Na Equação 1, B_w representa a largura de banda do canal, S a energia relacionada ao sinal e N é a energia média do ruído [6]. Melhorar a energia do sinal e a largura de banda pode aumentar a capacidade do sistema de comunicação, sendo que a duplicação de rádios oferece uma solução prática para otimizar o desempenho em redes IoT de recursos limitados.

Em função do exposto, este trabalho apresenta o **Dual-Radio-Dual-Slotframe** (DRDS), uma implementação de um algoritmo de escalonamento, para redes TSCH, adaptado para comunicação dupla e simultânea, oferecendo uma análise comparativa de métodos de escalonamento para arquiteturas com dois rádios.

Diversos trabalhos têm focado na otimização de redes TSCH aprimorando os algoritmos de escalonamento e melhorias na arquitetura. Ribeiro Jr et al. [7] introduziram o uso de dois rádios com CSMA, enquanto nossa abordagem foca em um protocolo TSCH aprimorado para comunicação dual com TDMA. Em [8], uma arquitetura de comunicação dual foi proposta, similar à utilizada neste trabalho, mas sem a inclusão de um algoritmo de escalonamento para aumento de vazão.

Outros trabalhos exploram aumento da largura de banda como: ROMA [9] que propõe um protocolo multi-rádio para redes de malha, mas que não possui foco no TSCH; FWB [10] que amplia o uso de CSMA para canais de maior largura de banda, mas que diferencia do nosso trabalho por não possuir foco no TSCH e explorar o uso de dois rádios; Variban [11] que explora o TSCH com multi-canais, mas sem utilizar arquitetura de dois rádios.

Portanto, as contribuições deste estudo são: (i) a apresentação e implementação de uma arquitetura que permite a comunicação utilizando dois rádios para redes sem fio que operam com o protocolo TSCH; (ii) o desenvolvimento do protocolo de escalonamento proposto, adaptado para o sistema operacional Contiki-NG; (iii) a experimentação e validação da abordagem em termos de taxa de transferência e taxa de entrega de pacotes; e (iv) a validação da proposta, demonstrando que ela alcança um melhor desempenho de taxa de transferência quando comparada com outras abordagens.

I. INTRODUÇÃO

Com o avanço das redes de sensores sem fio (RSSF), surgem diversas abordagens focadas em melhorar a qualidade da comunicação, especialmente em relação à vazão. Diversas aplicações de redes sem fio, como em setores industriais e cidades inteligentes, destacam-se pela demanda por alta vazão [1]. Nesse contexto, existem algumas aplicações que utilizam sensores equipados com dois rádios [2] para proporcionar um uso mais eficiente da rede, melhorando a qualidade da comunicação em termos de quantidade de dados entregues e assegurando a eficiência energética.

Dentre diversas abordagens com foco na melhoria das RSSFs, um destaque de grande importância é o *Time-Slotted Channel Hopping* (TSCH) [3] que é amplamente utilizado em diversos contextos, como sistemas de monitoramento industrial [4] e na integração de sistemas dedicados a ambientes agrícolas [5]. O TSCH propõe uma organização das transmissões em células baseadas em tempo e canais de comunicação, agrupados em uma estrutura chamada *slotframe*. Os dispositivos que operam com o protocolo sincronizam suas janelas de tempo, reduzindo as interferências e melhorando o desempenho global da rede. Equipado com um método de escalonamento de células correto, o TSCH aumenta a robustez da rede garantindo comunicações previsíveis em ambientes com interferências.

Apesar de o protocolo TSCH ser amplamente pesquisado, há pouco conhecimento sobre esse protocolo utilizando arquiteturas com dois rádios como uma abordagem para aumentar a vazão. O aumento vazão decorre da alocação simultânea de dois canais de 2,4 GHz, aprimorando as transmissões da rede e aumentando a largura de banda. O protocolo proposto suporta um sistema de comunicação com canais de capacidade C , sujeitos a ruído branco gaussiano, conforme a Equação 1.

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma: . A Seção II descreve o novo protocolo. A Seção III apresenta e discute os resultados. Por fim, a Seção IV conclui o artigo.

II. METODOLOGIA

Este trabalho propõe uma abordagem aprimorada para a aplicação da arquitetura com dois rádios no protocolo TSCH. Esse protocolo é conhecido por seu excelente desempenho em redes sem fio, principalmente pelo uso eficiente de algoritmos de escalonamento [12]. É essencial integrar um algoritmo de escalonamento apropriado para alcançar o desempenho ideal do protocolo. As próximas subseções explanam os detalhes da abordagem proposta.

A. Escalonamento

Mostra-se essencial um algoritmo de escalonamento adequado para a arquitetura proposta. O TSCH requer um algoritmo de escalonamento para organizar as células de comunicação, pois esses procedimentos utilizam a dinâmica dos intervalos de tempo com salto de canal para organizar a troca de mensagens. O método proposto permite comunicações paralelas simultâneas por meio da alocação de dois slotframes, organizando dois links de forma mais eficiente. A principal métrica analisada é a vazão, pois sua insuficiência compromete o desempenho da rede, sendo crucial para avaliar a eficiência na entrega de bytes em um dado tempo.

Ao utilizar dois slotframes com dois canais no TSCH, pode-se potencialmente aumentar a taxa de vazão em comparação com o uso de um único slotframe com um canal. O TSCH utiliza a técnica de salto de canal para aumentar a confiabilidade, transmitindo em diferentes canais em cada timeslot. Usar dois slotframes permite mais deslocamentos de canal únicos, efetivamente dobrando o número de canais disponíveis [13].

Ademais, um fator de bastante relevância na composição de escalonamentos consiste na complexidade de implementação do método de escalonamento. Atualmente, escalonamentos autônomos que estabelecem o mínimo de requisições apresentam maior aceitação na literatura [14], [15].

Por essa razão, este trabalho propõe o DRDS, cujo objetivo consiste na alocação de dois slotframes que dividem as comunicações duplicadas, autonomamente. Os slotframes são fracionados de forma distribuída, possuindo tamanhos fixos de apenas duas células por nó, de forma que cada célula seja preenchida por um dos links. No panorama global da rede, um escalonamento de tamanho $2 \times N$, em que N é o tamanho da rede é formado pelos *micro-slotframes* distribuídos. Quanto ao tipo de enlace, definem-se enlaces compartilhados capazes de suportar três tipos principais de comunicação nesse tipo de rede: comunicação de *Beacons*, *Broadcast*, e *Unicast*, como ilustrado na figura 1.

Portanto, os links são utilizados no início da composição da rede, no envio de mensagens de manutenção e no envio de pacotes unitários para endereços específicos. Em relação à alocação de recursos, assim como no escalonamento mínimo 6TiSCH [16], [17], ambos os links possuem slots de tempo definidos no slot 0 de cada slotframe distribuído. A técnica

de célula mínima permite múltiplos tipos de comunicação simultânea [18]. Os canais são escolhidos aleatoriamente, respeitando o limite de saltos de canais definidos pelo TSCH.

A figura 1 abaixo ilustra a divisão de recursos com os dois slotframes. Pode-se observar que a dualidade do slotframe é construída de forma distribuída não adicionando sobrecarga de operação aos nós em execução, ao construir dois slotframes de tamanho suficiente para alocar os enlaces.

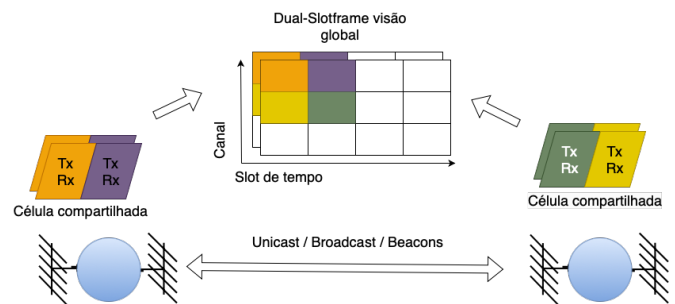


Fig. 1. Esquema de escalonamento.

Após a definição dos enlaces de comunicação, eles são atribuídos aos dois rádios. O algoritmo escolhe o primeiro enlace com base na atividade em um slot de tempo e o segundo pelo identificador do enlace, sem a necessidade de atualizar o ASN (Absolute Slot Number), que consiste em um contador global que mantém o controle do tempo em uma rede. Com os links atribuídos, os canais são relacionados aos respectivos rádios.

Dois pacotes são processados em cada intervalo de tempo. Após a validação, são enviados à camada de rádio. Após a transmissão, o buffer é atualizado para evitar conflitos. Enquanto isso, a thread de recepção obtém novos pacotes, prevenindo problemas na troca de pacotes.

Com dois rádios, é essencial evitar interferências, o que é garantido pelo uso de slotframes distribuídos. Cada canal TSCH tem largura de banda e frequência definidas. A duração do intervalo de tempo em 2,4 GHz permite a troca de dados e confirmações, e os canais precisam ser configurados para não interferirem entre si.

B. Driver de Rádio

Para adequação da performance de operação de dois rádios nos motes operados, é necessária a alocação de uma arquitetura específica que permita a divisão dos pacotes em dois caminhos, bem como a integração dos componentes das duas antenas.

Neste trabalho adaptou-se o *Cooja Radio Drive* da mesma forma feita por [8]. Neste trabalho, o esquema de manipulação com dois rádios propõe o gerenciamento de duplicatas de pacotes, de modo que apenas algumas camadas sejam alteradas para permitir a duplicação da comunicação. Para viabilizar a comunicação dupla com dois pacotes distintos, foi necessário modificar todas as funções diretamente relacionadas à comunicação, como preparação, envio, transmissão e leitura dos pacotes. Todas essas funções foram implementadas no

controlador de rádio do Cooja. De forma simplificada, o fluxo dos dois pacotes através dessas funções é detalhado no Algoritmo. 1.

Algorithm 1 Funções do driver do rádio

```

1: function PREPAREPACKET(Pck1, Pck2)
2:   return NewPck1, NewPck2
3:
4: function TRANSMITPACKET(NewPck1, NewPck2)
5:   if Pending1 != NULL and Pending2 != NULL then
6:     Send(NewPck1, NewPck2)
7:
8: function SEND(Pck1, Pck2)
9:   Radio1 ← NewPck1
10:  Radio2 ← NewPck2
11:
12: function READ(BuffR1, BuffR2)
13:  if BuffR1 > 0 or BuffR2 > 0 then
14:    ProcessNewPackets(RxPck1, RxPck2)
15:    return LenPck1, LenPck2
16:  return NULL

```

A partir do Algoritmo 1, observam-se as principais funções da comunicação por dois rádios. A função *PreparePacket* prepara o pacote, verificando tamanho e alocação de memória. A função *TransmitPacket* determina a disponibilidade dos rádios e aciona a função de envio (*Send*) para distribuir os pacotes entre os rádios. Na recepção, a função *Read* verifica a estrutura e o tamanho dos pacotes recebidos, encaminhando-os para as camadas superiores para processamento ou descartando-os em caso de erro.

III. RESULTADOS

Esta seção discute os resultados que demonstram a eficiência da arquitetura com dois rádios utilizando um escalonamento adequado para transmissões simultâneas. Para avaliar essa nova abordagem, utilizamos o Contiki-NG como sistema operacional primário e, para simulação, todos os testes foram executados no simulador Cooja.

As simulações no Cooja geram registros detalhados, como identificação de vizinhos, sub-redes e informações sobre pacotes. Um script em Python foi usado para analisar as métricas desses logs. Embora o Cooja emule diferentes arquiteturas de dispositivos, utilizamos a arquitetura Cooja Mote, que atende aos requisitos básicos para a implementação e avaliação do TSCH com o algoritmo de escalonamento. Essa arquitetura foi usada em todos os dispositivos e simulações.

Para base de comparação, utilizou-se um estudo que emprega uma arquitetura de comunicação de rádio único padrão, com escalonamento mínimo e uma implementação de comunicação de dois rádios. Na implementação de dois rádios comparada, os links são definidos sem rigor, de forma que muitos não chegam a ser diretamente utilizados. Não realizamos comparações com outros projetos de destaque na literatura uma vez que apresentam o desempenho de seus algoritmos em diferentes protocolos, e não no TSCH.

Para a implementação do protocolo, as camadas MAC e de roteamento utilizam os protocolos mais bem estabelecidos para redes de sensores sem fio aplicadas para IoT. Utilizou-se como protocolo padrão de roteamento o RPL. No TSCH, o tamanho padrão de cada slotframe é de 2 células e são criados dois slotframes para cada nó, tendo duração do timeslot de 10 ms.

Quanto ao ambiente de simulação, ao todo, foram realizadas 10 simulações para cada tamanho de rede, variando de 10 a 50 nós. Cada simulação, executada no COOJA, altera aleatoriamente a disposição geográfica dos nós em uma área simulada equivalente a 10.000 m². Cada mote possui um raio de alcance de 50 m.

A. Vazão

A primeira métrica utilizada para avaliar o desempenho do algoritmo é a vazão. A vazão geral é calculada com base no número de pacotes entregues, no tamanho desses pacotes, que varia entre 20 e 100 bytes, e no tempo gasto na transmissão. Quanto ao tamanho do pacote, o script contabiliza o tamanho informado pelo log no momento da recepção, incluindo pacotes unicast e broadcast na contagem. Quando o nó recebe um novo pacote, verificado pelo seu respectivo quadro, o algoritmo o considera como novo para fins de contagem.

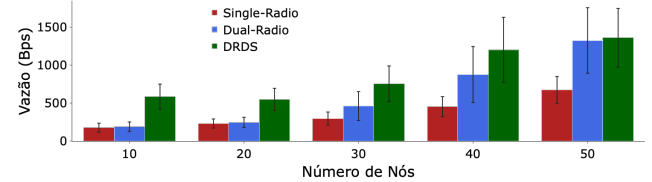


Fig. 2. Vazão.

Observando a Figura 2, percebe-se que, em relação à vazão, a abordagem DRDS apresenta desempenho superior no espectro do intervalo de confiança quando comparada às outras duas abordagens: rádio duplicado com 6TiSCH e rádio único com escalonamento utilizando 6TiSCH minimal. No entanto, em redes mais densas, o comportamento dos dois escalonadores tende a se assemelhar devido à falta de rigor na definição dos canais. Em redes densas, a necessidade de uma organização mais precisa dos canais se torna mais evidente.

B. Taxa de entrega de pacotes

Outra métrica importante para avaliar o DRDS é a taxa de entrega de pacotes, essencial para medir o desempenho em redes TSCH. Embora o foco principal seja a vazão, a confiabilidade também é crucial. Para calcular a taxa de recepção, usamos os logs das simulações, considerando a proporção de pacotes únicos recebidos em relação aos enviados, sem distinguir o tipo de pacote.

Conforme observado na Figura 3, o DRDS apresenta uma taxa de entrega de pacotes inferior às abordagens dual rádio e rádio único em redes de tamanhos específicos. A razão para

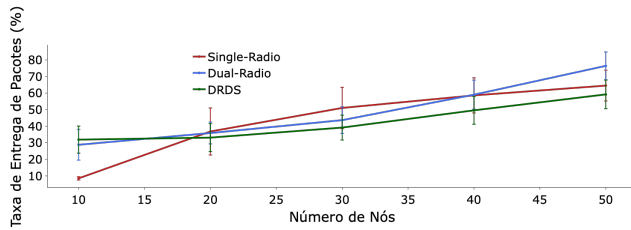


Fig. 3. Taxa de Entrega de Pacotes.

essa performance é a aleatoriedade na definição dos canais a serem utilizados, o que pode levar a interferências e perdas de pacotes. Contudo, mesmo não apresentando o resultado esperado, a taxa mostra-se bastante similar entre as abordagens. Sendo assim, é possível inferir que, com a combinação correta de canais, o desempenho do DRDS pode ser melhorado, potencialmente superando as demais abordagens.

Ademais, em uma visão geral, as taxas entre as três abordagens se assemelham, favorecendo a incorporação do método DRDS para aplicações cujo objetivo principal seja a vazão.

C. Eficiência Energética

O padrão implementado com a arquitetura de escalonamento foi avaliado utilizando o Cooja Mote, um mote exclusivo para simulações, sem especificações realistas de consumo energético.

Embora não haja uma análise precisa do consumo, argumenta-se que o uso de dois rádios não afeta significativamente o consumo energético [19]. Estudos com o hardware OpenMote, que suporta bandas de 868 MHz e 2,4 GHz, mostram que a comunicação em banda dupla pode melhorar o desempenho e otimizar o consumo de energia em redes TSCH [20].

Além disso, a organização dos slots no TSCH contribui para maior eficiência energética, e implementações reais demonstram que, com configurações adequadas, o consumo energético permanece aceitável mesmo com a duplicação da vazão [21].

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o protocolo Dual-Radio-Dual-Slotframe (DRDS) como uma abordagem inovadora para redes de sensores sem fio com dois rádios, implementado e avaliado no Contiki-NG e Cooja. Os resultados mostram que o DRDS melhora significativamente o desempenho e a eficiência da comunicação em comparação com abordagens tradicionais, sendo eficaz em diversos cenários.

Pesquisas futuras podem explorar o DRDS em outros contextos e condições de operação, além de investigar métricas como consumo de energia, latência e duty cycle, que são essenciais para a evolução das redes em ambientes IoT.

ACKNOWLEDGMENTS

We thank CAPES, CNPq, and FAPEMIG for partially funding this work.

REFERENCES

- [1] Ivonne Andrea Mantilla Gonzalez, Florian Meyer, and Volker Turau. A comprehensive performance comparison of ieee 802.15. 4 dsme and tsch in a realistic iot scenario for industrial applications. *ACM Transactions on Internet of Things*, 4(3):1–30, 2023.
- [2] Jens Zander, Seong-Lyun Kim, Magnus Almgren, and Olav Queseth. *Radio resource management for wireless networks*. Artech House, 2001.
- [3] Thomas Watteyne, Maria Palattella, and Luigi Grieco. Using ieee 802.15. 4e time-slotted channel hopping (tsch) in the internet of things (iot): Problem statement. Technical report, 2015.
- [4] Kyeong Tae Kim, Haeyong Kim, Huing Park, and Seon-Tae Kim. An industrial iot mac protocol based on ieee 802.15. 4e tsch for a large-scale network. In *2017 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, pages 721–724. IEEE, 2017.
- [5] Giovanni Valecce, Sergio Strazzella, Antonio Radesca, and Luigi Alfredo Grieco. Solarfertigation: Internet of things architecture for smart agriculture. In *2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, pages 1–6. IEEE, 2019.
- [6] Claude Elwood Shannon. A mathematical theory of communication. *The Bell system technical journal*, 27(3):379–423, 1948.
- [7] Nildo dos Santos Ribeiro Junior, Marcos AM Vieira, Luiz FM Vieira, and Omprakash Gnawali. Dual radio networks: Are two disjoint paths enough? *IEEE Internet of Things Magazine*, 4(1):67–71, 2021.
- [8] Vegar Krogsethagen. Implementing and evaluating dual-radios with tsch mac for industrial wireless sensor networks. Master's thesis, 2018.
- [9] Aditya Dhananjay, Hui Zhang, Jinyang Li, and Lakshminarayanan Subramanian. Practical, distributed channel assignment and routing in dual-radio mesh networks. In *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2009 conference on Data communication*, pages 99–110, 2009.
- [10] Rodrigo C Tavares, Marcos Carvalho, Eduardo P M Câmara Júnior, Erik de Britto e Silva, Marcos A M Vieira, Luiz F M Vieira, and Bhaskar Krishnamachari. Fwb: Funneling wider bandwidth algorithm for high performance data collection in wireless sensor networks. *Computer Communications*, 148:136–151, 2019.
- [11] Guilherme AS Milanez, Marcos AM Vieira, Luiz FM Vieira, and José Augusto M Nacif. Variban: A variable bandwidth channel allocation algorithm for ieee 802.15. 4e-based networks. *Computer Networks*, 231:109774, 2023.
- [12] Rodrigo Teles Hermeto, Antoine Gallais, and Fabrice Theoleyre. Scheduling for ieee802. 15.4-tsch and slow channel hopping mac in low power industrial wireless networks: A survey. *Computer Communications*, 114:84–105, 2017.
- [13] Nastooh Javan, Masoud Sabaei, and Vesal Hakami. Ieee 802.15. 4. e tsch-based scheduling for throughput optimization: A combinatorial multi-armed bandit approach. *IEEE Sens. J.*, 20(1):525–537, 2019.
- [14] Seohyang Kim, Hyung-Sin Kim, and Chongkwon Kim. Alice: Autonomous link-based cell scheduling for tsch. In *18th international conference on information processing in sensor networks*, 2019.
- [15] Simon Duquennoy, Beshr Al Nahas, Olaf Landsiedel, and Thomas Watteyne. Orchestra: Robust mesh networks through autonomously scheduled tsch. In *Proceedings of the 13th ACM conference on embedded networked sensor systems*, pages 337–350, 2015.
- [16] Tengfei Chang, Malisa Vucinic, Xavier Vilajosana, Simon Duquennoy, and Diego Dujovne. 6tisch minimal scheduling function (msf). *Internet Engineering Task Force, Internet-Draft draft-ietf-6tischmsf-02*, 2019.
- [17] David Hauweele, Remous-Aris Koutsiamanis, Bruno Quoitin, and Georgios Z Papadopoulos. Pushing 6tisch minimal scheduling function (msf) to the limits. In *2020 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 1–7. IEEE, 2020.
- [18] David Hauweele, Remous-Aris Koutsiamanis, Bruno Quoitin, and Georgios Z Papadopoulos. Thorough performance evaluation & analysis of the 6tisch minimal scheduling function (msf). *Journal of Signal Processing Systems*, 94(1):3–25, 2022.
- [19] Marcos A Sordi, Ohara K. Rayel, Guilherme L Moritz, and João L Rebelatto. Towards improving tsch energy efficiency: An analytical approach to a practical implementation. *Sensors*, 20(21):6047, 2020.
- [20] Glenn Daneels, Esteban Municio, Bruno Van de Velde, Glenn Ergeerts, Maarten Weyn, Steven Latré, and Jeroen Famaey. Accurate energy consumption modeling of ieee 802.15. 4e tsch using dual-bandopenmote hardware. *Sensors*, 18(2):437, 2018.
- [21] Xavier Vilajosana, Qin Wang, Fabien Chraim, Thomas Watteyne, Tengfei Chang, and Kristofer SJ Pister. A realistic energy consumption model for tsch networks. *IEEE Sensors Journal*, 14(2):482–489, 2013.